ЗНАНИЕ

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ

10'80

Ю. Н. Ефремов

# ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия
«Космонавтика,
астрономия»
№ 10, 1980 г.

Издается
ежемесячно
с 1971 г.

Ю. Н. Ефремов,
кандидат физико-математических наук

# ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Издательство
«Знание»
Москва
1980

ББК 22.66
Е92

**Ефремов Ю. Н.**
Е92 Звездные скопления.— М.: Знание, 1980. — 64 с., ил.— (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 10).
11 к.

Изучение звездных скоплений в нашей и других галактиках чрезвычайно расширило представление о внутреннем строении и эволюции звезд, а также предоставило весьма эффективный метод определения расстояний до далеких астрономических объектов. В брошюре приводятся различные сведения о звездных скоплениях, выясняются причины преимущественного образования звезд группами и роль межзвездной среды в этом образовании.
Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

20604 ББК 22.66
527

## ВВЕДЕНИЕ

Наверное, мало есть на свете людей, которые бы не знали созвездия Большой Медведицы. Знакомство с блистательным Орионом, туго перепоясанным тремя звездами своего пояса, говорит уже о довольно хорошем знании звездного неба. Многие легко находят крошечный ковшик Плеяд, появление которого на вечернем небе знаменует наступление осени, а знатоки могут показать и расположенную неподалеку на небе группу Гиад, и беспорядочно разбросанные слабые звезды Волос Вероники, и маленький хвостатый ромбик Дельфина, и соседнюю с ним Стрелу с раздвоенным оперением.

Большая Медведица, Орион, Дельфин и Стрела — это созвездия, а Плеяды и Гиады — звездные скопления, находящиеся в созвездии Тельца. Большинство созвездий было выделено еще в глубокой древности. Пополнение их списка завершилось в средние века, а в 1930 г. Международный астрономический союз окончательно утвердил границы 88 созвездий в обоих полушариях неба. В настоящее время «многоопытные» шестиклассники из астрономических кружков при планетариях лишь усмехаются, когда в каком-нибудь фантастическом рассказе читают о том, как гигантский гравилет мчится мимо звезд созвездия Лебедя. И они правы. Ведь созвездие — это лишь ограниченный участок небесной сферы, т. е. выделенное направление в космическом пространстве. В подавляющем большинстве случаев звезды, входящие в одно и то же созвездие, в пространстве находятся далеко друг от друга, иногда даже дальше, чем некоторые звезды, видимые в противоположных участках небосвода.

Имеются, однако, и знаменательные исключения. К их числу относятся как раз созвездия Большой Мед-

ведицы и Ориона. Пять из семи звезд, образующих характерную фигуру ковша Большой Медведицы, движутся параллельно и находятся в пространстве весьма близко друг к другу. Они входят в состав ядра ближайшего к нам звездного скопления, члены которого связаны взаимным притяжением. Периферийные члены этого скопления разбросаны по всему небосводу, к ним относится и самая яркая звезда на небе — Сириус.

Большинство ярких звезд созвездия Ориона также находится сравнительно близко друг к другу в пространстве. Они входят в состав обширной звездной ассоциации — группы молодых звезд, которые образовались в недрах находящихся здесь же обширных водородных облаков. Площади, занимаемые на небесной сфере обоими созвездиями, близки друг к другу, однако звезды Ориона расположены примерно в 20 раз дальше, чем ядро скопления звезд Большой Медведицы, и примерно во столько же раз больше и поперечник ассоциации звезд Ориона. Он достигает около 150 пс, и эта звездная ассоциация является одной из самых больших в окрестностях Солнца.

То, что Гиады и Плеяды — близкие звездные скопления, было известно давно. А вот что россыпь слабых звезд в созвездии Волос Вероники также образована физически связанными друг с другом звездами, стало известно лишь в 1915 г. С древних времен известно и скопление Ясли в созвездии Рака. Невооруженным глазом оно наблюдается как туманное пятнышко, так как ярчайшие звезды этого скопления имеют шестую звездную величину, т. е. каждая из этих звезд находится на пределе видимости. И лишь в сильный бинокль видно, что это пятнышко — скопление звезд (как говорят астрономы, в бинокль оно разрешается на звезды). Между прочим, любопытно английское название этого скопления — Улей. Неужели сверхзоркий глаз смог разрешить это скопление и без помощи оптики? Или у друидов — загадочного сословия жрецов у древних кельтов — были и оптические инструменты?

На этом, пожалуй, заканчивается перечень звездных скоплений, доступных невооруженному глазу. Два или три десятка скоплений видны с помощью бинокля, а всего в нашей звездной системе Млечного Пути — Галактике — сейчас известно почти 1500 звездных скоп-

лений. Точнее говоря, это касается лишь звездных окрестностей Солнца, так как далекие звездные скопления недоступны нашим телескопам, но всего их в Галактике должно быть несколько десятков тысяч.

Изучение звездных скоплений является едва ли не наиболее плодотворным занятием для астрономов, изучающих физику звезд и строение звездных систем. Связано это прежде всего с тем, что звезды в скоплении образовались в едином процессе и более или менее одновременно. Из трех основных характеристик звезд — массы, химического состава и возраста — две последние можно считать (строго говоря, лишь в первом приближении) одинаковыми для всех звезд, входящих в данное скопление. Следовательно, все разнообразие их свойств определяется только различием в массах. Это намного облегчает задачу сравнения выводов теории внутреннего строения и эволюции звезд с наблюдательными данными и позволило создать наиболее эффективный в настоящее время метод определения шкалы расстояний в Метагалактике.

В отличие от физиков астрономы не могут экспериментировать. Те области астрономии, в которых ныне стал возможен прямой эксперимент, когда изучаемый объект доступен непосредственным измерениям, по сути дела, уже отошли или отходят от астрономии. Так случилось с Луной, то же будет касаться скоро и планет. Астроном может что угодно делать с квантами излучения изучаемого объекта (и в настоящее время ему в этом смысле доступен весь диапазон длин волн), но он ни на йоту не может изменить условия, в которых зарождается это излучение. Он должен либо ждать, пока изменятся условия внутри объекта (или на пути идущего от него излучения), либо же отбирать объекты, характеристики которых зависят от как можно меньшего числа параметров. Именно поэтому особенно эффективными оказываются исследования переменных звезд (и других нестационарных объектов) и звездных скоплений. Физик, экспериментируя с какой-нибудь установкой, также часто варьирует только одну какую-либо характеристику, оставляя другие неизменными. Астрономы узнают особенно много, исследуя объекты, в которых подобные условия создаются самой природой.

## ЧТО ТАКОЕ ЗВЕЗДЫ?

Прежде чем говорить о звездных скоплениях, уместно сказать несколько слов о звездах. Сначала рассмотрим их обозначения, которые будут часто встречаться в этой брошюре. Ситуация, сложившаяся с этими обозначениями, подобна той, которая хорошо нам знакома по человеческому обществу: чем знатнее звезда, т. е. чем она ярче, тем больше у нее различных титулов-обозначений. Наиболее знатные особы, т. е. самые яркие звезды — первой и второй величины[1], носят собственные имена, в подавляющем своем большинстве дошедшие до нас с древнего арабского Востока (например, ярчайшая звезда в созвездии Ориона Бетельгейзе и вторая по яркости звезда в этом скоплении Ригель). Кроме того, эти звезды, как и все другие видимые невооруженным глазом, в каждом созвездии обозначены в порядке убывания яркости греческими буквами по алфавиту: Бетельгейзе — $\alpha$ Ориона, Ригель — $\beta$ Ориона и т. д. (эти обозначения даны Гиппархом). В XVII в. Флемсид просто пронумеровал все звезды в каждом созвездии, тоже в порядке убывания их блеска (например, 47 Тукана). К некоторым звездам, видимым невооруженным глазом, привились обозначения малыми латинскими буквами.

Большое количество обозначений звезд возникло при составлении различных каталогов звезд, обычно включающих в себя звезды вплоть до некоторой предельной (для этого каталога) звездной величины. Среди этих обозначений BS или HR (Каталог ярких звезд), GC (Генеральный каталог В. Босса), HD (Каталог Г. Дрэпера), BD (Боннское обозрение) и др. В частности, в астрофизических работах нашел широкое применение каталог, получивший имя любителя-астронома Г. Дрэпера. Этот каталог, включающий в себя 352 082 звезды, в

---

[1] Для оценки блеска звезд, видимых невооруженным глазом, Гиппарх во II в. до н. э. ввел специальную шкалу звездных величин. К звездам 1-й величины ($1^m$) он отнес наиболее яркие звезды, к звездам 6-й величины ($6^m$) — самые слабые. Этот принцип применен и при построении современной шкалы звездных величин, которая строится так, чтобы разнице в 5 звездных величин отвечало изменение блеска звезды в 100 раз. Таким образом, шкала звездных величин является относительной, в которой звездная величина $m$ — связана с блеском звезды $I$ соотношением $m = -2{,}5 \lg I +$ + константа.

том числе все звезды до $8,2^m$ и некоторые звезды 9—$10^m$, был создан А. Кеннон, которая в одиночку в течение полувека проклассифицировала спектры звезд, полученные с помощью небольшого телескопа, купленного на средства Г. Дрэпера. Составление каталога закончилось лишь в 40-е годы нашего столетия. Подобного рода героическому труду одного человека (Ф. Аргеландера) обязано своим появлением в середине прошлого века и Боннское обозрение.

Таким образом, яркие звезды имеют до десятка обозначений только в важнейших каталогах. Существует еще огромное множество каталогов, содержащих какие-либо отдельные характеристики звезд (лучевые скорости, собственные движения, параллаксы и т. д.). Они составляются и для всего неба, и для отдельных его областей. Звезды, вошедшие в такие каталоги, обычно обозначаются именем его автора или названием обсерватории и соответствующим порядковым номером.

Особо нужно сказать об обозначении переменных звезд. Сначала их обозначали большими латинскими буквами в каждом созвездии, начиная с R, затем их стали обозначать двумя буквами: RR, RS и т. д. до ZZ. Когда эти сочетания иссякли, вернулись к началу алфавита — от AA до QQ. Однако во многих созвездиях имеется больше 334 переменных звезд, и для их обозначения пришлось перейти просто к букве V с соответствующим порядковым номером.

Звездные скопления в основном обозначаются их порядковыми номерами в каталоге Мессье (*M*) или Новом генеральном каталоге скоплений и туманностей (NGC). Многие открытые впоследствии скопления носят имена обнаруживших их астрономов. Однако некоторые скопления имеют обозначения, употребляющиеся для звезд (например, двойное скопление $\chi$ и $h$ Персея). Недавно Международный астрономический союз принял решение обозначать звездные скопления просто их координатами. Впрочем, нет бо́льших консерваторов, чем астрономы: обозначения и термины, даже явно неудачные, в астрономии остаются во всеобщем употреблении на многие века.

Обратимся теперь к вопросу о природе звезд. Их изучение составляет главную задачу астрономов хотя бы потому, что вся жизнь на Земле зависит от ближайшей к нам звезды — Солнца, а в нашей Галактике на

долю звезд приходится 98% общей массы, тогда как планетные системы являются лишь побочным продуктом образования звезд. В Галактике, по-видимому, сотые доли процента от ее массы приходятся на долю твердого вещества и всего 2% — на долю облаков межзвездного водорода [2].

Сродство звезд Солнцу, принимавшееся еще некоторыми мыслителями древности, было окончательно доказано лишь в 1837 г., когда впервые удалось измерить расстояние до одной из ближайших к нам звезд. Количество энергии, излучаемое звездой, которое легко определяется, если известны расстояние и видимый блеск звезды, оказалось сравнимым в среднем с энергией, излучаемой Солнцем. Хотя и имеются звезды, выделяющие энергию в сотни тысяч раз больше или меньше по сравнению с Солнцем. Проблема источников энергии звезд — этих гигантских газовых (точнее, плазменных) шаров — была решена только в конце 30-х годов этого столетия после возникновения и соответствующего развития ядерной физики. Этими источниками являются термоядерные реакции синтеза — слияние более легких ядер в ядра более тяжелых элементов. Последние ядра оказываются чуть более легкими, чем дает сумма исходных ядер, и именно данная разность масс (дефект массы) и превращается в энергию согласно соотношению Эйнштейна $E = mc^2$.

В недрах большинства звезд протекают термоядерные реакции превращения водорода в гелий — четыре протона объединяются в альфа-частицу. Эти реакции происходят в глубинных слоях звезд, где температура достигает нескольких десятков миллионов градусов. Такая температура возникает в результате гравитационного сжатия — завершающего этапа конденсации протозвезды из газового облака. При достижении достаточно высокой температуры, вызванной этим сжатием, в центре звезды начинается ядерное горение водорода и дальнейшее сжатие прекращается. Истощение водорода в ядре звезды приводит к охлаждению и сжатию звездного ядра, и в результате температура снова повышается

---

[2] Эти цифры, как и многие другие приводимые в данной брошюре, не следует принимать за абсолютные. Даже очень хорошие наблюдательные данные звездной астрономии могут быть ошибочны на 20—30%; приведенные оценки могут отличаться от реальных значений в несколько раз.

и становится достаточной для включения термоядерной реакции превращения гелия в углерод. Дальнейшая судьба звезды определяется последовательной сменой термоядерных реакций, по-разному происходящей у звезд с той или иной массой. Углерод может далее превращаться в кислород, и такого рода цепочка термоядерных реакций продолжается до тех пор, пока не образуются элементы группы железа.

Равновесие звезды поддерживается газовым давлением, которое успешно противостоит силе тяжести, стремящейся стянуть вещество звезды к ее центру. Это давление возникает из-за высокой температуры, обеспечиваемой термоядерными реакциями, и существует, пока не истощатся запасы ядерного горючего. После этого звезда малой массы превращается в сверхплотный белый карлик, или нейтронную звезду, а звезда с массой, большей 3—4 масс Солнца, должна, вообще говоря, сжаться за пределы так называемого гравитационного радиуса. После достижения звездой этого радиуса даже кванты излучения не могут оторваться от звезды и она исчезает для внешнего наблюдателя. Поэтому-то такой объект и называют черной дырой.

Однако иногда (а для звезд большой массы, возможно, и всегда) заключительные стадии эволюции звезд сопровождаются грандиозной катастрофой — взрывом звезды. При этом звезда излучает в течение нескольких суток столько же энергии, сколько целая галактика, состоящая из нескольких миллиардов обычных звезд. Это явление получило название вспышки сверхновой, поскольку она напоминает намного более слабую вспышку новых, возникающую при попадании водорода от одного из компонентов двойной звездной системы на горячую поверхность другого. Возникающая при этом бурная термоядерная реакция и приводит к вспышечному процессу. Эти вспышки новых, наблюдавшиеся астрономами с древних времен, принимались ими за появление на небе новой звезды, хотя и тогда уже было известно, что, просияв несколько суток или недель на небе, такая звезда постепенно угасает.

Все эти этапы звездной эволюции, предсказанные теоретическими представлениями о термоядерных реакциях как источниках энергии звезд, подтвердились многочисленными результатами наблюдений, самые убедительные из которых получены как раз при изучении

звездных скоплений. В их правильности сейчас практически никто не сомневается, и если они все же окажутся ошибочными, может потерпеть фиаско вся стройная взаимосвязанная система наших представлений о мире звезд. Вот почему так много внимания привлекло к себе несколько лет назад сообщение о том, что эксперименты по регистрации солнечных нейтрино дали существенно меньшую интенсивность, чем это следует из теории внутреннего строения и эволюции звезд. Однако делать отсюда вывод о несостоятельности этой теории так же неблагоразумно, как приходить к заключению об аварии на МОГЭС, если у вас в квартире потухла лампочка. Это меткое замечание профессора Д. Я. Мартынова в последнее время, кажется, вполне оправдывается, поскольку, согласно сегодняшним представлениям, существует два вида нейтрино, один из которых и не может быть обнаружен в проводившемся эксперименте. Да и раньше небольшие модификации представлений о строении Солнца или о протекании термоядерных реакций приводили к исчезновению расхождений наблюдений с теорией.

Менее ясен вопрос о происхождении звезд, хотя их конденсация из газопылевых туманностей, всегда наблюдающихся рядом с молодыми звездами, почти не вызывает сомнений у астрономов. Во всяком случае групповое происхождение звезд вытекает из всех теоретических работ. Это означает, что ключ к решению проблемы звездообразования дает изучение как раз тех звезд, которые встречаются только в скоплениях — это и будут самые молодые звезды.

## ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

В 1908 г. Э. Герцшпрунгом, а позднее и независимо Г. Ресселом была построена диаграмма, на которой сопоставляется светимость звезды с ее поверхностной температурой. Согласно теории оба этих параметра однозначно определяются массой звезды и ее химическим составом — количеством и качеством ее топлива. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела является главным рабочим инструментом астрономов, изучающих звездные скопления и эволюцию звезд [3].

[3] Более подробно об основных характеристиках этой диаграммы см.: С. А. Ламзин. Звездный ветер.— М.: Знание, 1980.

Для звездных скоплений не надо знать расстояния, чтобы определить относительные светимости звезд — практически все члены одного скопления можно считать находящимися на одинаковом расстоянии от нас. При этом видимая звездная величина, определяющая блеск звезды, отличается в скоплении от абсолютной звездной величины, определяемой светимостью, на одну и ту же величину, называемую модулем расстояния.

Абсолютная звездная величина $M$ для данной звезды равна ее видимой звездной величине, если эту звезду поместить от нас на расстоянии 10 пс. Согласно закону обратной пропорциональности блеска звезды от квадрата расстояния имеется соотношение между видимой и абсолютной звездными величинами $m$ и $M: I/I_0 = 2{,}512^{M-m} = 10^2/r^2$, где $I$ — блеск звезды на расстоянии $r$, а $I_0$ — блеск, который она имела бы на расстоянии 10 пс. Прологарифмировав это соотношение, получим, что $0{,}4\ (M - m) = 2 - 2\ \lg r$, или $\lg r = 0{,}2\ (m - M) + 1$. Модулем расстояния и называется величина $m - M$, входящая в эту формулу.

Зная расстояние до звезды и ее блеск, мы можем легко определить и светимость[4] (правда, следует при этом учитывать и ослабление блеска звезды частицами межзвездной пыли, которое иногда бывает очень большим). Блеск звезды различается при его измерении в спектральных интервалах, отличающихся друг от друга как положением в спектре, так и шириной интервала. Поэтому спектральные интервалы, в которых определяется блеск звезды, в астрономии строго зафиксированы соответствующим международным соглашением. Наибольшее распространение получила так называемая широкополосная фотометрическая система *UBV*, при использовании которой блеск звезд измеряется в ультрафиолетовой (*U*), синей (*B*) и желтой (*V*) областях спектра.

Итак, мы разобрали, как определяются координаты вертикальной шкалы на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Другая (горизонтальная) шкала этой диаграммы задается температурой, определяемой по распределению энергии в спектре теплового излучения звезды. Однако последнее означает, что вместо темпера-

[4] Светимость легко определить, зная абсолютную звездную величину, и поэтому мы в дальнейшем будем употреблять обе эти характеристики как равноправные.

туры мы с равным успехом можем использовать так называемый показатель цвета — разность видимых звездных величин в двух различных спектральных интервалах: например, $U - B$ или $B - V$. При этом опять-таки необходимо учитывать межзвездное поглощение света, которое не только ослабляет блеск звезды, но и приводит к увеличению (как говорят, к «покраснению») показателя цвета звезды.

Межзвездное поглощение не влияет на спектральный класс звезды, который определяется по характеру спектральных линий: интенсивность и положение последних зависят прежде всего от температуры поверхностных слоев звезды. Именно с этой температурой связаны степень ионизации и интенсивность спектральных линий тех или иных химических элементов, что было доказано в 1922 г. индийским физиком М. Саха. Тогда же стало ясно, что в первом приближении химический состав звезд одинаков: на 70% они состоят из водорода, на 26—30% — из гелия и лишь 0,01—4% приходится на долю всех остальных элементов.

Спектральные классы, определяемые и сейчас чаще всего глазомерным сравнением спектра излучения звезды со стандартным, в порядке убывания температуры расположены следующим образом: O, B, A, F, G, K, M. У звезд класса O температура поверхности составляет 40 000 K, у звезд класса A — 10 000 K, у звезд класса G (к ним относится и Солнце) — 6000 K, а у самых холодных звезд (класс M) температура поверхности равна 3000 K и в спектре их излучения уже появляются многочисленные линии и полосы молекулярных соединений. Именно для того, чтобы получить такую температурную последовательность, был нарушен алфавитный порядок спектральных классов, выделенных еще в конце прошлого века. Чтобы облегчить запоминание последовательности спектральных классов, Г. Рессел в свое время предложил следующую фразу: «Oh, Be A Fine, Girl, Kiss Me», а студенты-физики Московского педагогического института, слушавшие астрономию у профессора Б. А. Воронцова-Вельяминова, использовали такое предложение: «О, Борис Александрович! Физики Ждут Конца Мучений».

Первая диаграмма светимость — поверхностная температура была построена Э. Герцшпрунгом в 1908 г. для звезд скопления Гиады. На ней ярчайшие звезды

главной последовательности (ГП), находящиеся в левом верхнем углу, отделялись от холодных звезд высокой светимости (гигантов) широким пробелом, получившим позднее имя Герцшпрунга. Современная диаграмма для скопления Гиады изображена на рис. 1, *а*. Дальнейшие исследования показали, что при самых высоких светимостях пробел Герцшпрунга заполняется сверхгигантами, хотя большинство из них имеют спектральный класс M (во много раз реже классы B и A).

Наиболее точно определены расстояния до ближайших звезд, для которых можно еще измерить их тригонометрический параллакс — смещение на небесной сфере вследствие движения Земли вокруг Солнца. На рис. 1, *б* показана диаграмма Герцшпрунга — Рессела для всех известных звезд, находящихся от нас на расстоянии не более 20 пс. Как видно, здесь почти нет звезд большой светимости (они очень редки и, естественно, не попали в данную область пространства), а все остальные находятся в полосе ГП. Данная диаграмма в общем правильно отражает относительную численность звезд разных классов, хотя красных карликов (слабых и холодных звезд) на самом деле должно быть намного больше, но их очень трудно обнаружить. Следует отметить, что звезды классов O и B часто называют ранними, горячими, голубыми, а звезды классов K и M — поздними, холодными, красными. И действительно, Ри-

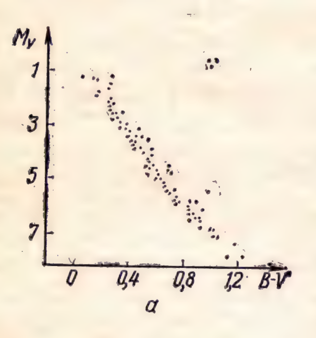






Рис. 1. Диаграмма цвет—светимость *а* — для скопления Гиады; *б* — для ближайших к Солнцу звезд (не далее 20 пс)

гель (класса B8I) кажется невооруженному глазу голубой, а Бетельгейзе (M2I) — красной звездой.

Уже в 40-х годах стало ясно, что запасов ядерного горючего в звездах высокой светимости хватает ненадолго, на какой-нибудь миллион лет, и поэтому такие звезды должны быть в несколько тысяч раз моложе, чем Галактика. Тем самым было окончательно разрушено представление об одновременном образовании всех звезд в Галактике в некую отдаленную эпоху.

Согласно теории все разнообразие диаграмм Герцшпрунга — Рессела для скоплений в первом приближении объясняется только различием их возраста. В молодых скоплениях даже наиболее массивные и яркие звезды находятся на начальной ГП, куда они попадают по окончании своего гравитационного сжатия. По мере увеличения возраста скопления и выгорания водорода в недрах звезд самые яркие из них отходят на диаграмме Герцшпрунга — Рессела вправо вверх от начальной ГП, а когда водород в ядре звезды большой массы полностью превратится в гелий, она скачком (чем и объясняется пробел Герцшпрунга) переходит в область сверхгигантов. Этот скачок на диаграмме соответствует быстрому сжатию ядра звезды и повышению его температуры, в результате чего в недрах красных сверхгигантов начинает уже идти термоядерная реакция превращения гелия в углерод.

Уход с ГП происходит тем быстрее, чем больше масса и светимость звезды, и поэтому возраст скопления определяется светимостью его ярчайших звезд, еще оставшихся на ГП. И вообще, время жизни звезды на данном этапе эволюции пропорционально массе (запасам ядерного топлива) и обратно пропорционально светимости (темпу, с которым эти запасы расходуются). Светимость же пропорциональна массе в третьей степени, и поэтому чем больше масса, тем короче жизненный путь звезды. У звезд малых масс (меньше двух масс Солнца) переход с ГП в область красных гигантов происходит медленнее. Пробел Герцшпрунга с возрастом скопления уменьшается (см. рис. 1) и затем вовсе исчезает; горение гелия у звезды начинается лишь тогда, когда она находится у вершины ветви гигантов. Диаграммы Герцшпрунга — Рессела для старых скоплений показывают характерный поворот ГП, которая без всякого пробела переходит в ветвь гигантов. Присутствие в окрест-

ностях Солнца звезд разного возраста, находящихся на различных стадиях ухода от начальной ГП, и объясняет то, что ширина ГП на рис. 1, *б* существенно больше, чем у ГП скопления Гиады (см. рис. 1, *а*).

Массовое построение диаграмм Герцшпрунга — Рессела для различных скоплений и их сопоставление с выводами теории привели в 50-х годах к появлению современных представлений об эволюции звезд. При этом понадобилось развитие вычислительной техники, теории ядерной физики, методов фотоэлектрической фотометрии и способов определения расстояний и поглощения света. Создание теории внутреннего строения и эволюции звезд безусловно считается крупнейшим достижением астрономии в XX в. Можно, правда, заподозрить, что данное чувство благополучия весьма обманчиво. Разве мало было случаев в прошлом, когда всеобщая убежденность в понимании какого-либо явления впоследствии оказывалась ниспровергнутой?

Однако сегодняшнего ощущения благополучия отнюдь не было у астрономов 20-х и 30-х годов нашего столетия, которые жаловались на то, что модели звезд сменяют друг друга столь же быстро, как модели дамских платьев. Тогда была лишь уверенность в том, что решение проблемы близко. «Разумно надеяться, что в не слишком отдаленном будущем мы будем способны понять такую простую вещь, как звезда»,— писал в 1926 г. А. Эддингтон. И действительно, основные принципы, заложенные им в теорию внутреннего строения звезд, оказались правильны, а в 1938 г. Г. Бете подтвердил и идею Эддингтона о том, что источниками энергии звезд являются ядерные реакции.

Теория не только предсказала ряд астрономических объектов и явлений, не наблюдавшихся ранее, и объяснила многие из тех, которые были не известны или не использовались при ее создании. При этом важнейшие достижения были получены на основе анализа диаграмм Герцшпрунга — Рессела, полученных в 1953—1956 гг. для десятка звездных скоплений. В настоящее время надежные диаграммы построены примерно для 400 звездных скоплений в Галактике и для 60 — в ближайших галактиках (Магеллановых Облаках). И среди этих скоплений не оказалось ни одного, диаграмма Герцшпрунга — Рессела которого противоречила бы выводам теории звездной эволюции.

Двадцать лет назад один из крупнейших советских астрономов профессор Б. В. Кукаркин любил повторять, что теория Шварцшильда — это только модное увлечение, через несколько лет о ней забудут. Однако и он сам в 70-е годы стал использовать ее выводы для интерпретации диаграмм Герцшпрунга — Рессела для шаровых скоплений. М. Шварцшильд — один из первых теоретиков, рассчитавших эволюцию звезд, у которых не происходит потери массы и перемешивания вещества. Его расчет был сначала лишь одним из возможных теоретических вариантов эволюции звезд — в 50-е годы диаграмма Герцшпрунга — Рессела была сплошь усеяна теоретическими эволюционными треками, располагающимися по разные стороны и вдоль ГП. Именно сравнение этих треков с диаграммами, построенными для звездных скоплений, показало, что в природе осуществляется вариант, рассчитанный Шварцшильдом. Однако связывать современную теорию звездной эволюции только с именем этого ученого было бы несправедливо, так как можно назвать еще два десятка теоретиков и наблюдателей, стоявших у ее истоков.

## ТИПЫ ЗВЕЗДНЫХ ГРУППИРОВОК

Кратные звездные системы, которые насчитывают от 2 до 6—8 членов, вращающихся вокруг общего центра тяжести, еще не являются звездными скоплениями. В последних количество звезд на несколько порядков больше. По своему внешнему виду звездные скопления разделяют на рассеянные (или открытые) и шаровые. В рассеянных звездных скоплениях насчитывают от нескольких десятков (так называемые бедные скопления) до нескольких тысяч (богатые скопления) звезд. Как видно из названия, звезды в рассеянных скоплениях слабо концентрируются к их общему центру. Возраст этих скоплений может быть весьма разнообразным — от $10^6$ до $5 \cdot 10^9$ лет.

Самые обширные и молодые рассеянные скопления носят название звездных ассоциаций. На фотографиях обычно их невозможно выделить на фоне других звезд, и лишь специальные исследования (скажем, спектральные) позволяют установить, что пространственная плотность звезд определенного типа в ассоциации больше, чем вне занимаемого ею объема. Выделяют так назы-

ваемые О-ассоциации, в которых группируются горячие звезды спектральных классов О и В. Однако если в звездной ассоциации нет звезд других классов, то, согласно теории, члены такой ассоциации не могут длительное время противостоять действию приливных сил со стороны массивного ядра Галактики и О-ассоциация должна распасться за время порядка $10^7$ лет. Это послужило В. А. Амбарцумяну главным обоснованием для вывода о продолжающемся в настоящее время групповом образовании звезд в Галактике. Вывод совершенно бесспорный, хотя и сейчас остаются нерешенными проблема наличия маломассивных звезд в О-ассоциациях и вопрос о стабильности последних.

Все звездные скопления, о которых шла речь во введении, относятся к рассеянным. Шаровые скопления намного более редкие образования, их концентрация в пространстве также намного меньше, чем у рассеянных, и поэтому они не встречаются в звездных окрестностях Солнца. Лишь в Южном полушарии неба невооруженным глазом можно наблюдать два шаровых скопления, едва видимых как слабые звездочки. Они и получили обозначение не в каталогах скоплений или туманностей, а как слабые звезды — ω Кентавра[5] и 47 Тукана. Однако светимость шаровых скоплений обычно в сотни и тысячи раз больше, чем у рассеянных звездных скоплений. И это несмотря на то, что в них нет ярких звезд,— но дело здесь не в качестве, а в количестве звезд, которых насчитывается в шаровых скоплениях до нескольких сотен тысяч. Все эти скопления очень стары, их возраст 10—15 млрд. лет (это самые старые объекты в Галактике).

Правда, в Магеллановых Облаках есть немало шаровых скоплений с возрастом $10^7$—$10^8$ лет, что долгое время ставило в тупик астрономов. В настоящее время доказано, что они действительно молоды (по диаграммам Герцшпрунга — Рессела) и в то же время обладают огромными массами ($10^5$ масс Солнца) и резкой концентрацией к центру скопления, т. е. все, как у шаровых скоплений Галактики, за исключением возраста.

Рассеянные звездные скопления концентрируются к плоскости вращения Галактики, они редко встречаются за пределами полосы Млечного Пути, тогда как шаро-

[5] Обычно это созвездие называют Центавром, но мы ведь знаем из мифологии кентавров, а не центавров.

вые скопления концентрируются к центру Галактики. Подобно другим объектам плоской составляющей Галактики, рассеянные скопления упорядоченно вращаются около галактического центра по почти круговым орбитам, а шаровые скопления обладают эллиптическими орбитами, вытянутыми в различных направлениях. Рассеянные скопления имеют нормальный, т. е. близкий к солнечному, химический состав — доля тяжелых элементов в их звездах составляет 1—4%, а у звезд шаровых скоплений она колеблется от 0,1 до 0,01%.

Не подлежит сомнению, что это отличие объясняется различием условий в Галактике, в которых образовывались рассеянные и шаровые скопления. Последние сформировались в сферической газовой протогалактике, вещество которой еще не было обогащено тяжелыми химическими элементами, а рассеянные скопления — из обогащенного тяжелыми элементами газа, оседшего к плоскости вращения Галактики — в ее диске. Образование рассеянных скоплений продолжается и в настоящее время, поскольку в плоскости Галактики еще достаточно для этого газа.

Помимо звездных скоплений и ассоциаций, в других галактиках известны и так называемые сверхассоциации — гигантские группировки горячих звезд и газа. Если у рассеянных скоплений поперечник обычно составляет всего несколько парсек, а у ассоциаций — в среднем около 100 пс, то у сверхассоциаций он достигает 1000 пс.

Как выясняется в последнее время, огромные звездные группировки — комплексы поперечником в несколько сотен парсек — образуют и более старые звезды и скопления, имеющие возраст вплоть до $10^8$ лет. По всей видимости, все это означает, что именно до такого возраста прослеживаются следы совместного происхождения звезд, скоплений и ассоциаций в гигантских облаках водорода.

## САМЫЕ МОЛОДЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Вернемся теперь к примечательному созвездию нашего зимнего неба — Ориону. Ниже трех звезд его узкого пояса видна цепочка из трех более слабых звезд (подвешенный к поясу меч небесного охотника). Средняя из этих слабых звезд кажется невооруженному глазу ту-

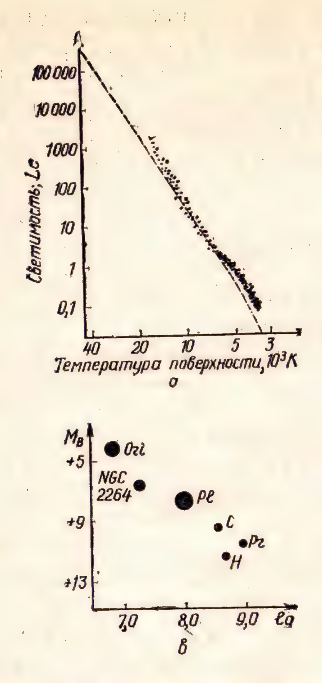
манной, а в бинокль здесь действительно видна небольшая светлая туманность. В ее центре находится система из четырех звезд — Трапеция Ориона. Одна из этих звезд, спектрального класса О6, ионизирует окружающее водородное облако. На фотографиях в инфракрасных лучах давно уже обнаружено, что туманность скрывает целое скопление звезд, к которому относят и Трапецию.

В этой же области обнаружены также и многочисленные переменные звезды, показывающие либо быстрые неправильные колебания блеска (типа T Тельца), либо краткие вспышки, во время которых блеск звезды за несколько минут увеличивается в десятки раз, а затем в течение получаса возвращается к исходному значению (типа UV Кита). Эти звезды сильно концентрируются к центру скопления Трапеции.

Первая диаграмма Герцшпрунга — Рессела для этой области была построена в 1954 г. выдающимся исследователем Галактики, основателем московской звездно-астрономической школы П. П. Паренаго. На этой диаграмме только наиболее яркие звезды скопления находятся на ГП, более же слабые, включая переменные звезды, располагаются от ГП справа. Так впервые раскрылись основные черты самых молодых звездных скоплений, объясненные теорией лишь несколько лет спустя.

Как уже говорилось, чем больше масса звезды, тем меньше время ее пребывания на ГП. Поэтому самые яркие звезды скопления уклоняются вправо от начальной ГП. Однако правее ГП находятся и наиболее слабые звезды (рис. 2, *а*). Собственно говоря, они являются еще протозвездами, поскольку не успели закончить свое гравитационное сжатие и подойти к ГП (двигаясь справа налево). Со столь ранней стадией эволюции, очевидно, связана и переменность блеска у большинства этих объектов, чаще всего объясняемая как следствие бурных движений газа в обширной конвективной оболочке протозвезд, не закончивших гравитационную конденсацию.

На рис. 2, *б* представлена диаграмма Герцшпрунга — Рессела для другого очень молодого звездного скопления NGC 2264. Она показывает хорошее согласие наблюдательных данных с выводами теории: большинство звезд этого скопления лежит на диаграмме между изохронами (линиями одинакового возраста), соответствующими возрастам $3 \cdot 10^5$ и $3 \cdot 10^6$ лет. Изохрона, на которой на-



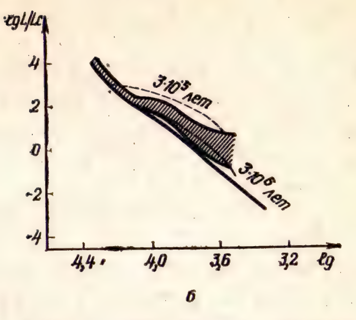




Рис. 2. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела и возраст скоплений: *а* — диаграмма для рассеянного скопления с возрастом $3 \cdot 10^7$ лет; *б* — диаграмма для молодого скопления NGC 2264 (заштрихованная область, пунктирами указаны теоретические изохроны); *в* — зависимость между возрастом скопления и светимостью его ярчайших вспыхивающих звезд (типа UV Кита)

ходятся звезды разных масс, но одного и того же возраста, и является теоретической диаграммой Герцшпрунга — Рессела, построенной для звездного скопления, возраст звезд в котором одинаков. Впрочем, эта одинаковость весьма относительна, поскольку разброс в возрастах для отдельных звезд в скоплении NGC 2264 заведомо достигает $10^6$ лет, а может быть, и больше. Последнее означает, что в этом скоплении, как и в созвездии Ориона, звездообразование продолжается и в настоящее время. Имеются и многие другие признаки того, что вся область, покрывающая на небе созвездие Ориона, является очагом звездообразования, в разных частях которого $10^7$ лет назад началось и по сей день происходит образование звезд из имеющегося там газа.

На расстоянии 12° от Трапеции Ориона, в голове небесного охотника, находится О-ассоциация, возраст которой оценивается в $10^7$ лет, в ней уже нет газа и пыли. Ярчайшие звезды созвездия Ригель и красный сверхгигант Бетельгейзе, очевидно, также связаны с этим давно действующим очагом звездообразования.

Очаг звездообразования в Орионе является одним из ближайших к Земле[6]. В 4—6 раз дальше от нас находится более мощный очаг звездообразования в созвездии Персея, связанный с радиоисточником W 3 и очень молодыми звездными скоплениями IC 1805 и IC 1848. Размеры этого комплекса достигают 500 пс. Характеристики имеющегося там молекулярного облака, масса которого в несколько раз больше, чем в облаке Ориона, также говорят об идущем в нем сейчас звездообразовании.

Известно и много других областей звездообразования, в основном на расстоянии 4—8 кпс от галактического центра. Все они оказываются связанными с облаками молекулярного водорода, обладающими массой в среднем порядка $10^5$ масс Солнца. Как примесь в этих облаках присутствуют молекулы CO, $H_2HCO$, $CH_3HCO$, $CH_3CN$ и многие другие. Есть основания полагать, что такие облака должны находиться в наиболее плотных областях огромных комплексов атомарного водорода.

Однако имеются такие звездные группировки, которые состоят только из звезд типа T Тельца и в них полностью отсутствуют нормальные звезды главной последовательности. Эти так называемые T-ассоциации можно наблюдать, только если они находятся достаточно близко от нас. Такова T-ассоциация в созвездиях Тельца и Возничего, находящаяся на расстоянии около 200 пс от Солнца и связанная с обширной темной туманностью.

Возраст T-ассоциаций порядка $10^5$ лет. Наблюдения в далекой инфракрасной области спектра позволяют выявить и еще более молодые скопления, почти полностью состоящие из протозвезд. Так, в районе газопылевой туманности в созвездии Змееносца, в наиболее плотной ее части, находится скопление 70 инфракрасных источников, являющихся, по-видимому, протозвездами. Поглощение оптического излучения в направлении каждого из этих источников больше, чем в близлежащих областях неба, и по-другому зависит от длины волны, что указывает на существование пылевых оболочек около источников, но с другими размерами и химическим составом пылинок, чем в окружающем газопылевом облаке. Это полностью соответствует теории, утверждаю-

---

[6] Более подробно об этом см.: М. Уернер, Е. Беклин, Дж. Нейгебауэр. Образование звезд в свете инфракрасных исследований.— В кн.: Современные проблемы астрофизики.— М.: Знание, 1980.

щей, что у протозвезд и должны наблюдаться такие оболочки — остатки газопылевой туманности, из которой они сконденсировались. У массивных протозвезд, которые по приходе на ГП делаются достаточно горячими, такие оболочки быстро рассеиваются, и молодое звездное скопление становится видимым в коротковолновой части спектра. У протозвезд малой массы они сохраняются надолго, и по крайней мере часть особенностей спектров звезд типа Т Тельца объясняется существованием таких оболочек. Спектры некоторых из этих звезд и прямо указывают на выпадение последних остатков протозвездного облака на образовавшиеся звезды.

Если переменность звезд типа UV Кита и Т Тельца на самом деле связана с их эволюционной молодостью[7], то соотношение между переменными и стационарными звездами должно зависеть от возраста скопления: в более старых скоплениях лишь медленно эволюционирующие звезды малой массы сохраняют вспышечную активность. Рис. 2, *в* показывает, что такого рода зависимость действительно существует.

Мы видим, что практически всегда признаки звездообразования наблюдаются в районах газопылевых туманностей и что несомненна тесная генетическая связь газа и звезд. Есть, однако, случаи, когда этого на первый взгляд не наблюдается, и наиболее известный из них — двойное скопление $\chi$ и $h$ Персея. Оно хорошо видно в бинокль на границе созвездий Персея и Кассиопеи и представляет собой великолепное зрелище даже в небольшой телескоп: среди россыпи ярких голубых звезд то тут то там вкраплены рубиновые. Здесь много звезд высокой светимости класса О и несколько столь же ярких красных сверхгигантов класса М. Присутствие последних позволяет оценить возраст скопления в $10^7$ лет, но, несмотря на относительную молодость скопления, в нем не наблюдаются ни нейтральный (атомарный) водород, ни так называемые области HII — облака ионизованного водорода наподобие туманности Ориона. Наиболее правдоподобно это можно объяснить тем, что весь газ из скопления был выметен либо излучением звезд класса О, либо в результате очень давних

---

[7] Причем именно эволюционной, а не абсолютной, поскольку возраст некоторых звезд типа UV Кита может достигать $10^9$ лет, но их массы столь малы (0,04 массы Солнца), что они еще находятся на стадии гравитационного сжатия.

вспышек сверхновых, не оставивших более никаких следов. С отсутствием газа в скоплении может быть связано и отсутствие там звезд типа Т Тельца. Правда, они в этом далеком скоплении могут быть очень слабы и поэтому не видны, и пока исчерпывающих поисков переменных звезд в $h$ и $\chi$ Персея не велось.

Поблизости от двойного скопления расположен обширный очаг звездообразования, связанный с радиоисточником W 3, описанный ранее. Не там ли находится газ, выметенный из скопления $\chi$ и $h$ Персея? Вообще вся эта область носит следы длительной и сложной эволюции, во время которой неоднократно происходило интенсивное звездообразование. И вполне может быть, что наблюдатели на Земле появились как раз тогда, когда в двойном скоплении исчерпались запасы газа, звездообразование прекратилось, но постареть звезды еще не успели.

### СКОПЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА

В скоплениях, возраст которых превышает $2 \cdot 10^7$ — $3 \cdot 10^7$ лет, обычно отсутствует диффузное вещество — связь звезд и породившего их молекулярного облака уже распалась. Светлые туманности около звезд Плеяд (см. последнюю страницу обложки) — это пылевые облака, отражающие свет от находящихся поблизости звезд, но генетическая связь их с Плеядами сомнительна. Возраст скопления Плеяды около $7 \cdot 10^7$ лет.

В этом звездном скоплении с малым количеством членов нет красных гигантов, и естественно было бы спросить, куда подевались звезды более яркие, чем покидающие в настоящее время ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела этого скопления? Самый простой (и, как мы увидим, неверный) ответ — их в Плеядах никогда и не было. Можно пойти и дальше, предположив, что в любом скоплении звезды, более яркие, чем есть сейчас, отсутствуют не потому, что они уже проэволюционировали, а поскольку каждое скопление обладает своим собственным распределением звезд по светимости (или, как говорят, функцией светимости), которое обрывается у вполне определенных значений светимости, различных для разных скоплений.

Однако многие наблюдательные данные, независимые от наших представлений об эволюции звезд, указы-

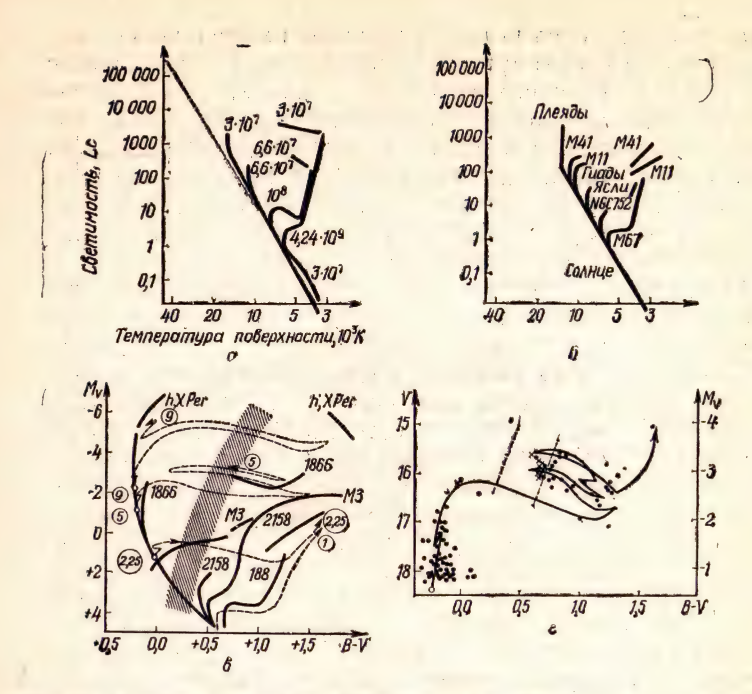



Рис. 3. Сводные диаграммы Герцшпрунга — Рессела: *а* — теоретические диаграммы для скопления разных возрастов; *б* — для нескольких рассеянных скоплений; *в* — для четырех рассеянных и одного шарового (М 3) скоплений с эволюционными треками для звезд различной массы (указана в кружочках; штриховкой показана полоса нестабильности); *г* — для сравнения приведена диаграмма цвет — светимость молодого скопления NGC 1866 в БМО с эволюционным треком для звезды с массой 5 масс Солнца (полоса нестабильности ограничена пунктирными линиями; крестиками указаны цефеиды, в которые превратились сверхгиганты)

вают на то, что чем больше возраст скопления, тем слабее в нем ярчайшие звезды. Кроме того, ряд рассуждений приводит к выводу об одинаковости (в первом приближении!) начальной функции светимости для всех скоплений. Например, если бы это было не так, то в изобилии бы наблюдались скопления, все звезды которых, вплоть до самых ярких, лежали в начальной ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Но таких скоплений почти нет (за исключением нескольких очень молодых), и ярчайшие звезды всегда уклоняются вправо вверх от начальной ГП. И ярчайшими они стали совсем недавно,

когда пришел черед более массивным их предшественникам полностью покинуть ГП. Однако звезды, ушедшие с ГП, лишь недолго находятся на стадии красного сверхгиганта или (для менее массивных звезд) на стадии гиганта. Поэтому-то последние и отсутствуют в Плеядах: из-за малого числа его членов звезды, находившиеся ранее на стадии гиганта, в настоящий момент уже превратились в белый карлик (или нейтронную звезду), а звезды с меньшей массой еще не покинули ГП.

Если это рассуждение верно, то в каждом не слишком молодом скоплении должно быть определенное, зависящее от возраста и количества членов число белых карликов. Поиск их был начат еще четверть века назад, но и по сей день задача еще далека от решения. Для поиска этих очень слабых звезд нужны самые крупные телескопы и необходима кропотливая работа по доказательству того, что найдены именно белые карлики и что они являются членами скопления. Тем не менее эта задача очень важна для развития теории эволюции звезд, поскольку позволила бы ответить и на вопрос о конечной судьбе массивных звезд. Пульсары, отождествляемые с нейтронными звездами, никак не связаны с рассеянными скоплениями, хотя и имеют, по-видимому, некоторое отношение к молодым О-ассоциациям. Означает ли это, что большинство массивных звезд перед истощением своих энергетических ресурсов успевают сбросить избыток массы и поэтому превращаются в белые карлики? Впрочем, следует учесть, что пульсары лишь сравнительно короткое время излучают свои радиоимпульсы, да и скорости их движения в пространстве слишком велики, чтобы имелась надежда обнаружить их в скоплениях среднего возраста, даже если они и образуются в последних.

Диаграммы Герцшпрунга — Рессела для скоплений среднего возраста (см. рис. 3, *а, б*) хорошо согласуются с теорией, которая утверждает, что звезда с массой больше двух масс Солнца скачком покидает верхнюю границу ГП. Быстро пересекая пробел Герцшпрунга, звезда достигает области красных сверхгигантов (рис. 3, *в*). Сжатие звездного ядра, начавшееся при сходе с ГП, в этот момент заканчивается — температура становится достаточной для включения термоядерной реакции превращения гелия в углерод. Как показывают расчеты, звезда начинает затем передвигаться влево,

описывая на диаграмме петлю, с тем бóльшим размахом, чем больше масса звезды. Так, сверхгиганты классов B и A в скоплении $\chi$ и $h$ Персея, положение которых на диаграмме Герцшпрунга — Рессела соответствует левым концам петель, находятся уже снова вблизи ГП (см. рис. 3, *в*).

Для звезд с массами около 4—5 масс Солнца левый конец петель попадает в полосу нестабильности (рис. 3, *в* и *г*), в пределах которой находится ряд пульсирующих переменных звезд, и в частности цефеиды. Поскольку в точках поворота петель эволюция звезд замедляется, большинство цефеид должно обладать именно такими массами, и мы вправе ожидать, что цефеиды должны встречаться преимущественно в скоплениях с возрастом около $5 \cdot 10^7$ лет, на диаграмме Герцшпрунга — Рессела которых на верхнем конце ГП и в областях, соответствующих более поздним стадиям эволюции, находятся звезды с массами 4—5 масс Солнца.

На самом деле все было наоборот. Сначала в скоплениях обнаружили цефеиды, и это позволило предположить, что они образуются из массивных звезд главной последовательности. И лишь продолжительное время спустя была развита теория, объяснившая встречаемость цефеид в скоплениях только определенного возраста. Это стимулировало дальнейшие исследования цефеид в скоплениях, что привело в свою очередь к уточнению теории, и т. д.

Про цефеиды знают даже далекие от астрономии люди. Желтые сверхгиганты, пульсирующие с точностью часового механизма, они показывают тем бóльшую светимость, чем больше период изменения их блеска. Цефеиды наблюдаются на больших расстояниях, даже в ближайших галактиках, и служат базисом для всей шкалы расстояний до Вселенной. Именно их обнаружение в Туманности Андромеды позволило Э. Хабблу в 1924 г. доказать, что она является соседней галактикой, подобной нашей. А в дальнейшем, опираясь на данные о цефеидах в близких галактиках, он определил расстояния до более далеких галактик с большим красным смещением линий в их спектрах и в 1929 г. доказал расширение Вселенной.

Наклон зависимости период — светимость, характерной для цефеид, можно определить, наблюдая их, например, в Магеллановых Облаках. Далее, чтобы на-

ходить расстояния, необходимо шкалу видимых звездных величин заменить шкалой абсолютных величин, а для этого надо знать светимость хотя бы одной цефеиды. Все они слишком далеки от Солнца, и тригонометрический параллакс даже для ближайших[8] к нам цефеид сравним с ошибками его определения. По той же причине мало было надежд и на статистические параллаксы, использующие перемещение Солнца в пространстве, и другие методы, опирающиеся на ничтожно малые (из-за большого расстояния) собственные движения цефеид.

В 1952 г., изучая первые фотографии Туманности Андромеды, полученные на 5-метровом рефлекторе обсерватории Маунт-Паломар, В. Бааде заявил, что светимость цефеид занижена на $1{,}5^m$, а все расстояния во Вселенной в действительности вдвое больше. Понятно поэтому, с каким интересом было встречено сообщение Дж. Ирвина, который, наблюдая цефеиды в Южном полушарии неба, обнаружил в 1955 г., что две из них находятся в звездных скоплениях. Тогда только появились надежные методы определения расстояний до скоплений (о чем будет рассказано позже), и исследования цефеид — членов скоплений — открывали путь к решению данной проблемы. Однако необходимо было доказать что цефеиды на самом деле входят в скопления, а не случайно проецируются на них, находясь в действительности ближе или дальше в пространстве.

Статистически эту задачу решил П. Н. Холопов, который тогда же, не зная еще о работе Ирвина, построил распределение переменных звезд вокруг центра сводного скопления и нашел, что вероятность случайной проекции 16 выявленных им цефеид на скопление составляет всего 0,0017. Составленный им первый список цефеид и других переменных звезд в рассеянных скоплениях опроверг мнение Х. Шепли о том, что в этих скоплениях вообще не бывает переменных звезд. Вхождение цефеид в состав нескольких скоплений в Галактике в дальнейшем подтвердилось совпадением лучевых скоростей, положением на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, близким к положению других сверхгигантов — членов скопления, сходством значений поглощения света для цефеид и звезд скопления, а в одном случае, когда определения

---

[8] Ближайшей цефеидой, кстати говоря, является Полярная звезда, но амплитуда колебаний ее блеска слишком мала, чтобы заметить переменность этой звезды без помощи фотометра.

собственных движений оказались особенно надежными,— и близостью этих величин у скопления и цефеиды. Вообще же говоря, выявление членов звездной группировки, особенно при отсутствии данных об их лучевых скоростях,— трудная и неоднозначная задача, решение которой зависит порой от интуиции, а также от убежденности и предубежденности астронома. Статистические аргументы могут лишь подсказать, что определенный тип звезд встречается в данного типа скоплениях, но, конечно, конкретная звезда лишь с той или иной вероятностью может быть отнесена к соответствующему скоплению.

Исследования цефеид в рассеянных скоплениях в общем подтвердили правоту Бааде, и следует сказать, что существенную роль при этом сыграли советские астрономы, несмотря на их скромное тогда наблюдательное оборудование. Не менее половины из двух десятков цефеид — членов звездных скоплений и ассоциаций, на которых держится сейчас зависимость период — светимость, были или впервые отмечены как таковые, или детально изучены учеными Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга (ГАИШ) в Москве, что особенно приятно отметить перед 50-летним юбилеем создания института и 150-летием вошедшей позже в его состав Астрономической обсерватории Московского университета. Расскажем о двух наиболее интересных случаях исследований цефеид, проводившихся в ГАИШ.

Еще в 1949 г. Г. А. Старикова, наблюдая с помощью 40-сантиметрового рефрактора Абастуманской обсерватории загадочную переменную звезду CE Кассиопеи, показывавшую странные полуправильные колебания блеска, обнаружила, что на самом деле это двойная звездная система, состоящая из цефеид. Наложением друг на друга двух кривых блеска с периодами 5,14 и 4,48 сут (рис. 4) и объяснялось ее странное поведение. По сей день CE Кассиопеи остается единственной известной двойной звездной системой, состоящей из цефеид. Правда, заметить орбитальное движение в этой паре и оценить массы цефеид удастся лишь через несколько тысяч лет...

В 1958 г. выяснилось, что CE Кассиопеи, как и соседняя цефеида CF Кассиопеи, входит в состав рассеянного скопления NGC 7790. Три цефеиды в одном скоплении!

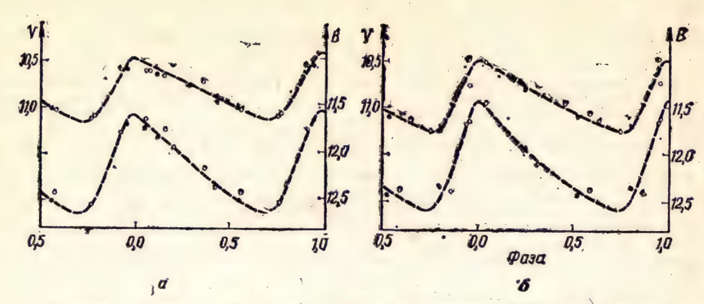


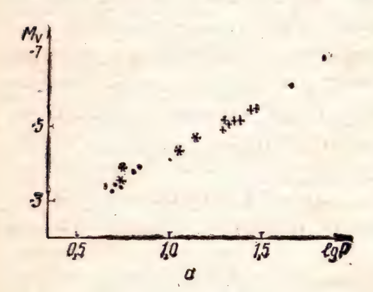

Рис. 4. Кривые блеска двойной системы CE Кассиопеи, входящей в состав рассеянного скопления NGC 7790, в синих (внизу) и желтых (вверху) лучах для двух компонентов

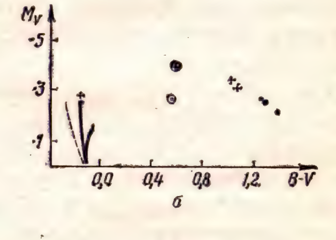
Однако детальное исследование CF Кассиопеи казалось невозможным, поскольку угловое расстояние между ее компонентами составляет всего 2,4″ и оба они «проваливаются» в диафрагму фотоэлектрического фотометра, а на фотопластинке оба изображения обычно сливаются в одно. Лишь в 1963—1965 гг. П. Н. Холопову и Ю. Н. Ефремову удалось исследовать звезду с помощью снимков с короткими экспозициями, полученными в Москве при хороших изображениях в кассегреновом фокусе 70-сантиметрового рефлектора ГАИШ. Оказалось, что на лучших из полученных снимков возможно раздельное измерение блеска каждого компонента на фотометре (см. рис. 4). Результаты аналогичных исследований, подтвердившие наши выводы, были позднее опубликованы американскими астрономами, использовавшими 5-метровый рефлектор.

В ГАИШ была разгадана и природа цефеиды V 367 Щита в рассеянном скоплении NGC 6649. В течение 10 лет ее период не удавалось определить, пока не доказано было в 1975 г., что периодов у нее два! Звезда относится к редкому типу цефеид, пульсирующих одновременно с основным периодом и обертоном. Обнаружение в молодом звездном скоплении цефеиды, пульсирующей с двумя периодами, позволило сразу же сказать, что звезды этого типа—лишь разновидность обычных цефеид и что они обладают такими же массой и характером эволюции, тогда как их массы предполагались существенно меньшими. Необходимо, однако, заметить, что лучевые скорости звезд в NGC 6649 до сих пор не

получены и поэтому принадлежность цефеиды скоплению пока не доказана.

Цефеиды подчиняются фундаментальным соотношениям период — плотность $P(\rho)^{1/2} = Q$ (где $P$ — период, $\rho$ — плотность, а $Q$ — так называемая постоянная пульсации) и масса — светимость, хотя той же массе цефеид соответствует существенно бóльшая их светимость, чем у звезд главной последовательности (это видно из характера эволюционных треков на рис. 3, *в*). Из этих соотношений легко получается и зависимость период — светимость: период больше у менее плотных звезд большой светимости (рис. 5, *а*), как и зависимость период — возраст; в скоплениях большего возраста уходят с ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела и попадают в пределы полосы нестабильности цефеиды меньших светимости и периода (рис. 5, *б*). Наблюдательные признаки существования зависимости период — возраст были получены автором в 1964 г. по данным о цефеидах, связанных со звездными скоплениями в Галактике. Первая диаграмма период — возраст включала в себя всего 12 звезд, в 1978 г. она была построена уже по данным о



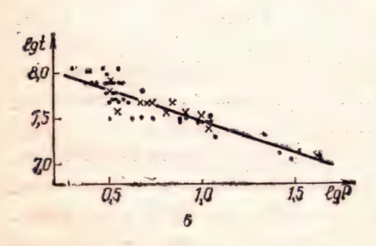




Рис. 5. Различные зависимости для скоплений, содержащих цефеиды: *а* — зависимость период — светимость цефеид для рассеянных скоплений (точки) и звездных ассоциаций (крестики) Галактики; *б* — диаграмма цвет — светимость для рассеянных скоплений M 25 (крестики) и NGC 6664 (точки), цефеиды обведены кружочками; *в* — зависимость период цефеид — возраст скоплений для Галактики (крестики), MO и M 31 (точки)

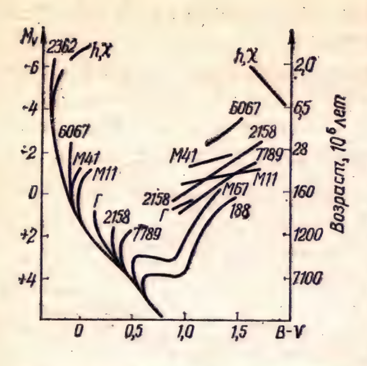



Рис. 6. Сводная диаграмма цвет — светимость для рассеянных скоплений в Галактике. Возраст, указанный на вертикальной шкале справа, определялся по светимостям ярчайших звезд ГП

64 цефеидах, большинство которых относилось к скоплениям в Большом Магеллановом Облаке (рис. 5, *в*).

Если до этого времени цефеиды помогали проникать в глубь пространства, ныне они позволяют заглянуть в глубь времен, и зависимость период — возраст уже используется для изучения истории звездообразования в других галактиках. Наблюдая в той или иной области преобладание цефеид определенного периода, можно заключить, что звездообразование столько-то лет назад там происходило наиболее активно. При этом становится ненужной весьма деликатная работа по построению точной диаграммы Герцшпрунга — Рессела для звезд скопления и определению его расстояния, необходимая для оценки возраста (рис. 6). Надо надеяться, что эта новая роль цефеид, с трудом, кажется, усваиваемая астрономами, не занимающимися ими специально, приведет к возобновлению исследования цефеид в ближайших галактиках.

Цефеиды ныне являются наиболее понятным типом переменных звезд, и в этом решающую роль сыграли их исследования в рассеянных скоплениях, без чего мы не знали бы ни массы, ни характера эволюции и плохо знали бы светимость этих звезд.

## ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Обнаружение зависимости период — возраст для цефеид позволило предположить, что звезды с наибольшими периодами (наиболее молодые из них) могут быть членами О-ассоциаций. Первый список таких цефеид был составлен в ГАИШ. В частности, обнаружилось, что результаты фотоэлектрической фотометрии подтверждают возможность связи нескольких цефеид со скоплением $\chi$ и $h$ Персея, заподозренной в 1943 г. В. Байдель-

маном. Он нашел, что примерно те же лучевую скорость и расстояние имеют несколько десятков сверхгигантов, расположенных на угловом расстоянии до 3° от двойного скопления. Эта звездная группировка позднее получила название ассоциации Персей OB1. О ней мы уже говорили ранее, теперь рассмотрим ее более подробно.

Помимо двойного скопления и окружающих его 60 сверхгигантов, она включает в себя, как теперь предполагается, четыре цефеиды, скопление NGC 957 и карликовые скопления Cz 8 и K4. Все эти объекты занимают область поперечником в 300—400 пс и находятся на расстоянии около 2 кпс от Солнца. Лучевые скорости сверхгигантов и цефеид заключены в пределах, казалось бы, слишком широких для членов одной группировки,— от —30 до —60 км/с, однако связь этих звезд со скоплением несомненна, так как они к нему явно концентрируются. Ранее упоминалось, что возраст скопления $\chi$ и $h$ Персея $10^7$ лет, тогда как возраст цефеид, судя по их периодам, доходит до $5 \cdot 10^7$ лет. Однако на диаграмме Герцшпрунга — Рессела для звезд этого скопления можно различить ответвления ГП, примерно соответствующие возрасту цефеид, а одна из цефеид находится вблизи карликовых скоплений Cz 8 и K4, возраст которых также $5 \cdot 10^7$ лет.

Большие размеры, большой разброс в возрастах и скоростях несомненны для этой звездной группировки, населенной далеко не одними звездами классов O и B, и уже поэтому она «не заслуживает» названия O-ассоциации. На нее очень похожа огромная группа звезд в окрестностях Солнца, давно известная под названием Местной системы. Размеры последней составляют около 700 пс, в нее входит треть окружающих Солнце звезд ранних классов и восемь скоплений с малым количеством членов, в том числе и скопление Плеяды. Возраст самых старых из этих скоплений достигает $5 \cdot 10^7$ лет. В темных пылевых облаках в созвездиях Тельца и Змееносца, как мы знаем, еще продолжается звездообразование (они, по-видимому, также входят в Местную систему). Именно существованием Местной системы объясняется наличие Пояса Гульда — тенденция наиболее ярких (и, следовательно, в среднем более близких) звезд концентрироваться не к Млечному Пути, а в полосе, наклоненной к нему под углом 17°. На основании общности

пространственных движений О. Эгген относит к Местной системе пять сверхгигантов, включая цефеиды δ Цефея, Полярную и, возможно, RT Возничего. Действительно, Местная система похожа на звездную группировку $\chi$ и $h$ Персея, хотя она явно беднее звездами и старше последней.

Не вызывает сомнений, что подобных не очень молодых огромных звездных группировок (их можно назвать звездными комплексами) в Галактике должно быть много. Они, очевидно, являются продуктами деятельности тех больших очагов, звездообразования, о которых рассказывалось на стр. 20. Существуют, конечно, и переходные формы — звездные группировки, в которых звездообразование идет еще весьма активно, но уже и появились цефеиды наибольших периодов. По данным о цефеидах автор выделил в Галактике свыше трех десятков таких звездных комплексов. О тенденции близких на небе скоплений иметь схожие характеристики писал еще Х. Шепли, ряд комплексов выделили по данным о звездных скоплениях К. А. Бархатова и Е. Д. Павловская.

Существование звездных комплексов позволяет ответить на вопрос о происхождении цефеид и вообще сверхгигантов, которые кажутся изолированными в пространстве, несмотря на свою молодость. Не ставит ли их существование под сомнение групповое образование звезд? Нет, как правило, такие звезды можно отнести к тому или иному звездному комплексу. Надо только смириться с тем обстоятельством, что ближайшие друг к другу звезды высокой светимости могут оказаться разделенными на расстояние в несколько сотен парсек и все же иметь общее происхождение.

Цефеиды легко обнаружить, расстояния их известны достаточно точно, и поэтому они весьма удобны для выделения звездных комплексов, которые, очевидно, должны содержать и большое количество звезд главной последовательности. Приписывание конкретной звезды к данному комплексу встречает еще большие трудности, чем выделение членов скопления, но данные о звездных группировках в Магеллановых Облаках и Туманности Андромеды, речь о которых пойдет позже, с полным основанием доказывают реальность существования обширных звездных комплексов.

## СТАРЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Обратимся теперь к более старым рассеянным скоплениям. Это понятие, конечно, растяжимое: Гиады в 10 раз старше Плеяд, но так же в 10 раз моложе наиболее старого рассеянного скопления NGC 188. Изохроны с увеличением возраста рассеянного скопления все больше приближаются по своей форме к эволюционным трекам (звезды самых старых скоплений, ушедшие с ГП, имеют близкие друг к другу массы). Растет в среднем и число звезд в скоплении. Уже так называемые скопления промежуточного возраста (около $10^9$ лет) с характерной длинной ветвью гигантов, отделенной небольшим пробелом от поворачивающейся к ней ГП (см. рис. 1 на стр. 13), такие, как NGC 2158 и NGC 7789, принимались ранее (до того как для них были построены диаграммы Герцшпрунга — Рессела) за шаровые скопления, бедные звездами. Большое количество звезд в старых скоплениях вызвано как наблюдательной селекцией (старые рассеянные скопления с малым количеством членов и без звезд высокой светимости трудно обнаружить на больших расстояниях от Солнца), так и тем, что старые рассеянные скопления, бедные звездами, имеют бóльшую вероятность разрушиться при сближении с массивными газовыми облаками. Последнее, видимо, является причиной того, что старые рассеянные скопления, как правило, обнаруживаются на достаточно больших (до 1 кпс) расстояниях от плоскости Галактики. Орбиты их обращения вокруг центра Галактики, следовательно, заметно наклонены к галактической плоскости, что дает им меньше шансов встретиться с массивными облаками, сильно концентрирующимися к этой плоскости.

Следует отметить, что ни в окрестностях Солнца, ни в каких-либо других областях Галактики нет звезд, которые находились бы правее и ниже ветви гигантов на диаграмме Герцшпрунга — Рессела для скопления NGC 188 (см. рис. 6). Это означает, что возраст звезд галактического диска (области распространения рассеянных скоплений) не превышает возраст скопления NGC 188. Поэтому оценка возраста этого скопления представляла для астрономов значительный интерес. До последнего времени возраст скопления NGC 188 принимался равным около $10^{10}$ лет (практически таким же, как и для шаровых скоплений). Химический состав этого

скопления, однако, является нормальным, и есть даже основания считать, что тяжелых элементов в нем больше, чем у Солнца. Но поскольку в шаровых скоплениях их в 10—100 раз меньше, а разрыв в возрасте между ними и старейшими рассеянными скоплениями получался очень небольшим, делался вывод о быстром (за время порядка $5 \cdot 10^8$ лет) обогащении диффузной среды тяжелыми элементами. Приходилось допускать, что за этот срок очень большое число звезд первого галактического поколения кончало свою жизнь, взрываясь как сверхновые и выбрасывая образовавшиеся в их недрах тяжелые элементы.

Последние оценки, однако, дают для скопления NGC 188 возраст около $5 \cdot 10^9$ лет, и, таким образом, имеется пробел примерно той же продолжительности между возрастами самых старых рассеянных скоплений и самых молодых шаровых скоплений. Возможно, что сам этот перерыв в звездообразовании в Галактике, на существовании которого (и ряда других) особенно настаивает А. А. Сучков, связан со слишком большой частотой вспышек сверхновых. Так или иначе после образования галактического диска, по-видимому, практически отсутствовало систематическое увеличение содержания тяжелых элементов в скоплениях с возрастом, хотя наблюдаются и заметные локальные флуктуации содержания тяжелых элементов в скоплениях. Это, вероятно, вызвано резким снижением частоты вспышек сверхновых.

Обратимся теперь к шаровым скоплениям. На памяти автора оценка их возраста менялась от $5 \cdot 10^9$ до $2{,}5 \cdot 10^{10}$ лет. Трудности, возникающие при определении возрастов этих скоплений, связаны не столь с учетом зависимости эволюции скоплений от их химического состава (в частности, здесь могут проявляться различия в содержаниях гелия, о чем до сих пор идут споры), сколько с удаленностью шаровых скоплений от Солнца. Нам доступен (да и то лишь у десятка шаровых скоплений) слишком малый участок ГП их диаграмм Герцшпрунга — Рессела, только используя который и можно оценить расстояние скоплений и светимость для звезд, уходящих с ГП. Шаровые скопления настолько далеки от нас, что именно при их исследованиях ставились рекорды по наблюдениям предельно слабых звезд. Для увеличения числа шаровых скоплений, на диаграмме Герц-

шпрунга — Рессела которых достигается точка поворота ГП вправо (см. рис. 3 на стр. 24), сейчас уделяется и некоторая доля наблюдательного времени на шестиметровом телескопе (эта работа была начата по инициативе Б. В. Кукаркина).

Современные оценки возрастов шаровых скоплений заключены в пределах от $10^{10}$ до $1{,}5 \cdot 10^{10}$ лет; различия их возрастов, таким образом, относительно невелики. Самое старое шаровое скопление лишь на треть своего возраста старше самого молодого, тогда как у рассеянных скоплений это различие составляет четыре порядка. Обычно считается, что шаровые скопления с большим содержанием тяжелых элементов моложе скоплений, бедных этими элементами. Но не объясняется ли и различие в оценках возраста шаровых скоплений различным влиянием химического состава на характер их эволюционных треков?

Характерной особенностью диаграмм Герцшпрунга — Рессела для шаровых скоплений является так называемая горизонтальная ветвь. Ее зачатки есть и у старейших рассеянных скоплений, на диаграмме Герцшпрунга — Рессела которых она лежит заметно ниже, но все же и здесь ветвь достаточно заметна. Населенность горизонтальной ветви звездами, как и некоторые другие характеристики диаграмм Герцшпрунга — Рессела шаровых скоплений, сильно зависит от химического состава: у скоплений, бедных тяжелыми элементами, сильно развита (больше звезд) голубая часть этой ветви; у скоплений, богатых тяжелыми элементами,— часть ветви, примыкающая к ветви гигантов (рис. 7).

Пожалуй, еще не существует устоявшейся интерпретации этой горизонтальной ветви. У шаровых скоплений на диаграмме Герцшпрунга — Рессела вправо от ГП находятся звезды с массой около одной солнечной, которые продвигаются вверх и вправо по ветви гигантов до тех пор, пока в центре звезд не начинается ядерное горение гелия. По-видимому, после этого звезды перепрыгивают скачком на горизонтальную ветвь и располагаются на ней в зависимости от своих (хотя и мало отличающихся) массы и химического состава. Эволюционного движения вдоль горизонтальной ветви, вероятно, не происходит, и эта ветвь является неким аналогом начальной ГП для звезд малых масс с ядерным горением гелия в их недрах.

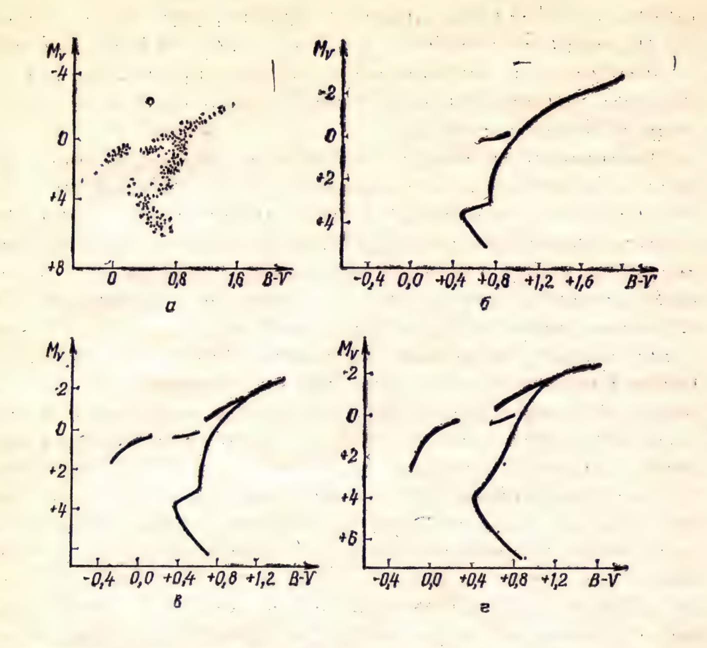



Рис. 7. Диаграмма цвет — светимость: *а* — для шарового скопления М 3 (кружочком отмечена цефеида); *б* — для шаровых скоплений 47 Тукана, М 71 и М 69, богатых тяжелыми элементами; *в* — для шаровых скоплений М 3, М 72 и М 5 со средним содержанием тяжелых элементов; *г* — для шаровых скоплений М 13 и М 80, ω Кентавра и NGC 6752, бедных тяжелыми элементами

Полоса нестабильности, содержащая звезды, для которых имеется соотношение между их температурой и светимостью, благоприятное для возникновения пульсаций во внешних звездных слоях, пересекает горизонтальную ветвь, и все звезды, находящиеся в этом отрезке пересечения, являются переменными типа RR Лиры. Характерный для них период пульсаций составляет от 0,3 до 0,7 сут, и это указывает на гораздо бо́льшую, чем у цефеид, плотность звезды. В данном скоплении звезды типа RR Лиры с меньшими периодами имеют почти синусоидальные кривые блеска с малыми амплитудами, характерные для пульсаций в обертоне, с ростом периода эти кривые сменяются резко асимметричными. Есть в некоторых шаровых скоплениях и немногочисленные

звезды, напоминающие цефеиды,— с периодами до 20 сут; они находятся на диаграмме Герцшпрунга — Рессела выше горизонтальной ветви (см. рис. 7), и в сущности неизвестно, как они туда попали. Для этих звезд также характерна зависимость период — светимость, однако их абсолютная звездная величина меньше на $2{,}1^{м}$, чем у цефеид при том же периоде пульсаций. Именно неверное отождествление таких звезд с цефеидами и было чуть ли не главной причиной значительной недооценки светимости последних, вскрытой Бааде и подтвержденной впоследствии исследованиями цефеид в рассеянных скоплениях.

Попадание звезды в полосу нестабильности с неизбежностью означает ее превращение в пульсирующую переменную, и исследования звезд типа RR Лиры показали, что граница этой полосы определена весьма резко: изменение показателя цвета уже на две-три сотых звездной величины разделяет постоянные и переменные звезды горизонтальной ветви, находящиеся у границы полосы нестабильности. Численность переменных звезд в скоплении зависит от того, попадает ли достаточно населенный звездами отрезок горизонтальной ветви в полосу нестабильности. В шаровом скоплении 47 Тукана с очень большим количеством членов имеются всего две звезды типа RR Лиры, так как горизонтальная ветвь на его диаграмме Герцшпрунга — Рессела лишена голубой части. В то же время в скоплении M 3, на диаграмме Герцшпрунга — Рессела которого горизонтальная ветвь развита полностью (см. рис. 7), находится около 200 таких звезд.

Не только численность переменных звезд, но и их характеристики зависят от химического состава шарового скопления. В скоплениях с малым количеством тяжелых элементов переход от синусоидальных кривых блеска с малыми амплитудами (пульсацией в периоде обертона) к асимметричным кривым блеска с большими амплитудами происходит (и очень резко) при периоде, равном в среднем 0,464 сут, а в скоплениях с большим содержанием тяжелых элементов — при периоде 0,57 сут (рис. 8). Однако возможно, что не только содержание тяжелых элементов определяет величину этого переходного периода и распределение звезд типа RR Лиры по периодам. Так, например, это содержание одинаково в скоплениях M 3 и ω Кентавра, но распределение перио-

дов резко отличается (рис. 8, *д*). Вероятно, оно зависит и от содержания гелия, и от возраста скопления.

На диаграммах Герцшпрунга — Рессела для некоторых шаровых скоплений, например для скопления М 3, над точкой поворота ГП находится группа звезд, отставших от других в общем эволюционном движении вправо (см. рис. 7). Для их обозначения часто используется термин «страглеры», что в переводе с английского означает «отставшие». Была выдвинута гипотеза, что они являются звездами второго галактического поколения, т. е. недавно образовавшимися в шаровом скоплении и не успевшими поэтому отойти от ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Однако образоваться им в шаровых скоплениях не из чего: в этих скоплениях практически нет межзвездного водорода и нет признаков, указывающих на наличие там пыли, обычно соседствующей с водородным газом. Возможно, «страглеры» задержались на ГП из-за того, что они, может быть, входят в состав тесных двойных систем, в которых осуществляется интенсивный обмен веществом между компонентами. Есть и предположение, что они могут оказаться звездами, захваченными шаровыми скоплениями при пролете последних через густо населенные звездами области галактического диска. Последующие детальные спектральные

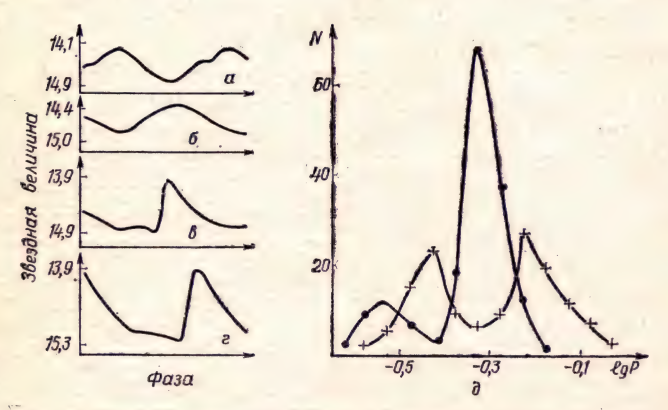



Рис. 8. Звезды типа RR Лиры в шаровых скоплениях: *а*, *б*, *в*, *г* — кривые блеска 4 из 137 таких звезд в скоплении ω Кентавра (сверху вниз графики соответствуют периодам 0,3808, 0,4739, 0,4744 и 0,5734 сут); *д* — распределение этих звезд по периодам в скоплениях М 3 (точки) и ω Кентавра (крестики)

исследования «страглеров» должны решить вопрос об их природе.

Несмотря на резкое различие диаграмм Герцшпрунга — Рессела для шаровых и рассеянных (но не слишком старых) скоплений, оно объясняется лишь различным возрастом этих звездных группировок. П. Н. Холопов выявил единство их строения (наличие ядра и обширной короны у всех звездных скоплений) и выдвинул веские аргументы в пользу того, что диаграммы Герцшпрунга — Рессела для шаровых скоплений, когда они еще были достаточно молоды, не отличались от диаграмм Герцшпрунга — Рессела для рассеянных скоплений. Действительно, как мы уже говорили, в Магеллановых Облаках есть скопления со столь же большим количеством членов, как и шаровые, но их диаграммы Герцшпрунга — Рессела, однако, указывают на молодой возраст скоплений. Так, в скоплении NGC 1866 (см. рис. 3, *г*) найдено с десяток цефеид и несколько десятков сверхгигантов, тогда как в галактических рассеянных скоплениях *М* 25 и NGC 6664 — по одной цефеиде и несколько сверхгигантов (см. рис. 5, *б*). Поскольку возрасты всех этих скоплений близки друг к другу, это означает, что скопление NGC 1866 имеет гораздо больше членов (на самом деле не в 10, а в 100 раз больше) и лишь из-за сильной удаленности от нас его центральные плотные области недоступны исследованию и в них могут скрываться еще много цефеид.

В таком случае естественно спросить, где же теперь те десятки тысяч звезд, которые ныне исчезли с диаграмм шаровых скоплений? Тот же вопрос мы задавали для звезд, когда-то населявших исчезнувшую ныне верхнюю часть ГП на диаграммах Герцшпрунга — Рессела для Плеяд и вообще для всех не слишком молодых рассеянных скоплений (правда, тогда речь шла лишь о нескольких десятках звезд). Как мы помним, все дело спасли белые карлики, но обнаружить их в шаровых скоплениях не под силу даже самым сильным телескопам. Образование белых карликов из массивных звезд требует предварительной и очень значительной потери массы звездами, и сброшенный газ должен сейчас остаться в шаровых скоплениях, масса которых как будто для этого достаточна. Но никакого газа в шаровых скоплениях нет, и поэтому некоторые астрономы считают, что он выметается оттуда либо звездным ветром,

«дующим» от многочисленных красных гигантов, имеющихся в скоплении, либо при прохождении скопления через галактический диск, приведшем к столкновению скопления с находящимися там газовыми облаками.

По всей видимости, в шаровых скоплениях действительно присутствуют огарки многих и многих звезд, входивших когда-то в исчезнувшую ныне верхнюю часть ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, в виде нейтронных звезд или, может быть, даже черных дыр; об этом говорит обнаружение мощных, иногда переменных источников рентгеновского излучения в нескольких десятках шаровых скоплений. Наблюдения, проведенные с помощью спутника «Эйнштейн», показали, что эти источники находятся точно в геометрическом центре шарового скопления, где, по-видимому, и скапливаются всевозможные продукты жизнедеятельности звезд.

## РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Прежде чем перейти к рассказу о том, как скопления разных типов распределены в Галактике, чуть более подробно ознакомимся с методами определения расстояний до этих объектов. Исходной точкой отсчета этих расстояний является скопление Гиады. Оно достаточно близко к нам, и поэтому проекции пространственных скоростей звезд, входящих в Гиады, на небесную сферу (собственные движения) направлены в одну точку, называемую радиантом. Подобным образом мы наблюдаем, как вдали сходятся вместе параллельные рельсы железной дороги. Зная угловое расстояние каждой звезды от радианта, можно собственные движения звезд (измеряемые в угловых секундах в год) приравнять их лучевым скоростям (измеряемым в километрах в секунду и определяемым по доплеровскому смещению линий в спектре), умноженным на тангенс углового расстояния звезд от радианта. Таким образом, линейные единицы расстояния (километры, входящие в размерность лучевой скорости) сопоставляются с угловыми единицами, и тем самым находится расстояние до скопления и строится его диаграмма Герцшпрунга — Рессела в абсолютных звездных величинах (путем прибавления модуля расстояния к видимым звездным величинам).

Для этой работы прежде всего требуются высокоточные измерения собственных движений звезд на больших площадях неба, что представляет собой весьма трудную

астрометрическую задачу. Многие годы модуль расстояния для Гиад принимался равным $3{,}03^m$, но работы последних лет, опирающиеся на положения далеких галактик, которые можно считать практически неподвижными относительно звезд рассеянных скоплений, дали значение $3{,}29^m$, которое на пределе точности подтверждается и тригонометрическими параллаксами звезд скопления. Теперь, совмещая ГП диаграммы Герцшпрунга — Рессела какого-нибудь скопления с прокалиброванной в абсолютных звездных величинах ГП диаграммы Герцшпрунга — Рессела для Гиад, можно определить модуль расстояния до исследуемого скопления, равный величине сдвига, требуемого для этого совмещения. Однако лишь в немногих близких к нам скоплениях доступны для изучения столь же слабые звезды, как те, которые еще сохранились на ГП довольно старых Гиад.

Выход из создавшегося положения нашли в 1956 г. А. Сендидж и Г. Джонсон, которые совместили ГП диаграмм Герцшпрунга — Рессела Гиад и Плеяд, не принимая во внимание верхнюю часть ГП, где звезды в своем эволюционном движении уклоняются вправо вверх. Аналогичным образом отсекая проэволюционировавшие ярчайшие звезды Плеяд, они совместили затем ГП диаграмм Герцшпрунга — Рессела Плеяд и молодого скопления вокруг звезды α Персея. Последовательно используя все более и более молодые скопления, Сендидж и Джонсон смогли восстановить положение ГП непроэволюционировавших звезд (т. е. начальную ГП) на диаграммах Герцшпрунга — Рессела для рассеянных скоплений во всем диапазоне абсолютных звездных величин (именно в этих величинах, так как исходной была диаграмма Герцшпрунга — Рессела для Гиад). Допуская теперь единство начальной ГП для всех рассеянных скоплений, можно определять модуль расстояния для любого скопления, которое имело бы хорошо определенную диаграмму Герцшпрунга — Рессела.

Точность определения расстояний до скоплений возросла на порядок, а когда в рассеянных скоплениях были обнаружены цефеиды, начальная ГП, уточненная еще раз Джонсоном (и поэтому получившая его имя), легла в основу всей шкалы расстояний во Вселенной. Однако это стало возможным только после разработки методов (что опять же в основном было сделано Джонсоном), с помощью которых можно учесть поглощение

света без привлечения спектральных данных. Развитие фотометрических методов определения как избытков цвета, так и расстояний до скоплений позволило сравнивать друг с другом диаграммы Герцшпрунга — Рессела различных скоплений, без чего невозможно было бы создать теорию звездной эволюции. В послевоенное время фотометрия стала фотоэлектрической, и в старых шкалах звездных величин обнаружились ошибки, достигающие $1^m$ и более. С середины 50-х годов началась новая эпоха в исследованиях звездных скоплений, и это были подлинно революционные достижения.

Однако и в наше время работы еще достаточно. Раньше расстояния до скоплений определялись с ошибками в несколько сотен процентов, но и теперь при определении этих расстояний могут быть ошибки (даже при наилучшей фотометрии) примерно до 30% величины. На рис. 9 пунктирной линией изображено положение начальной ГП на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, предложенное в 1964 г. И. М. Копыловым. Очевидно, что использование нового положения начальной ГП ведет к модулю расстояния для скопления $\alpha$ Персея, на $0{,}5^m$ меньшему, чем при использовании начальной ГП Джонсона. Соответственно меньше оказывается светимость звезд скопления (включая и цефеиды) и увеличиваются оценки его возраста. При построении начальной ГП Копылов использовал независимые от Гиад оценки расстояний до скоплений. Хотя они и менее точные, зато не требуют одинаковости химического состава для всех рассеянных скоплений. Использовался метод радианта, примененный на грани точности к скоплению $\alpha$ Персея, а также оценки светимости звезд по характеру линий в их спектрах.

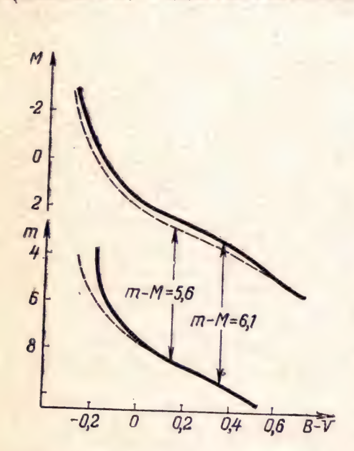


Рис. 9. Схема определения модуля расстояния. Вверху — начальные ГП Джонсона (сплошная линия) и Копылова (пунктир), внизу — ГП скопления $\alpha$ Персея

Причины различий между начальными ГП, полученными Копыловым и

Джонсоном, по-видимому, связаны с тем, что Гиады существенно богаче тяжелыми элементами, чем большинство рассеянных скоплений, и поэтому светимость их звезд несколько больше. П. Н. Холопов, построивший в 1978 г. наилучшую в настоящее время начальную ГП рассеянных скоплений, подтвердил последний вывод. Учитывая различие химического состава скоплений и поглощение света по данным среднеполосной фотометрии (т. е. с более узкой полосой пропускания, чем используемая в системе *UBV*), он совместил ГП в диаграммах Герцшпрунга — Рессела для 8 скоплений (приняв новый модуль расстояния для Гиад). Начальная ГП Холопова для звезд с малой светимостью проходит ниже начальной ГП Джонсона на $0{,}25^m$, а для звезд с большой светимостью — на столько же выше. Как и начальная ГП Джонсона, она применима к скоплениям с тем же химическим составом, что и Гиады[9].

Гораздо хуже обстоит дело с определением расстояний до шаровых скоплений. Здесь в принципе используется та же методика, что и для рассеянных скоплений, но возникающие при этом трудности гораздо значительнее из-за большой удаленности этих скоплений и из-за очень низкого и тем не менее разнообразного содержания тяжелых элементов. ГП диаграмм Герцшпрунга — Рессела, в той или иной степени уже проэволюционировавшая, построена все еще лишь для немногих шаровых скоплений, и только до этих скоплений мы знаем расстояния с достаточной определенностью. Различие в химическом составе оценивается по ультрафиолетовому избытку в показателе цвета: спектральные линии тяжелых элементов преимущественно располагаются в коротковолновой части оптического спектра. И поскольку у звезд шаровых скоплений они более слабы, это делает показатель цвета $U - B$ у звезд этих скоплений более голубым, чем у звезд рассеянных скоплений при том же самом показателе $B - V$.

---

[9] Большинство астрономов в настоящее время по-прежнему пока пользуются начальной ГП, практически совпадающей с начальной ГП Джонсона. Это связано с тем, что увеличение модуля расстояния Гиад на $0{,}3^m$ практически компенсируется (для большинства скоплений) более пониженным, чем в Гиадах, содержанием тяжелых элементов.

Звездами с характерным ультрафиолетовым избытком в их показателе цвета являются и субкарлики, и некоторые из них находятся достаточно близко, чтобы можно было определить их тригонометрический параллакс достаточно точно. Использование субкарликов весьма привлекательно, так как автоматически снимает влияние различий в положениях начальной ГП в зависимости от химического состава. Оценки расстояний до нескольких шаровых скоплений позволили определить светимость находящихся в них звезд типа RR Лиры. Она оказалась заключенной в интервале (в абсолютных звездных величинах) от 0 до $+1^m$, причем в скоплениях с меньшим содержанием тяжелых элементов эти звезды ярче. Используя данные о блеске звезд типа RR Лиры или, если такие звезды не обнаружены, данные о светимости звезд в примыкающем к полосе нестабильности участке горизонтальной ветви, можно определить модули расстояния и остальных шаровых скоплений (правда, менее точно).

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ В ГАЛАКТИКЕ

О резком различии в распределениях скоплений в нашей звездной системе — Галактике — в зависимости от их типа было известно очень давно. Едва ли не треть шаровых скоплений находится в созвездии Стрельца, т. е. в направлении центра Галактики, но есть они и на высоких галактических широтах, далеко от плоскости Млечного Пути, к которой сильно концентрируются рассеянные скопления. Правда, ядро скопления Большой Медведицы далеко от этой плоскости, а скопление Волос Вероники находится почти точно в полюсе Галактики, но это объясняется лишь близостью к нам этих рассеянных скоплений. Очень мало рассеянных скоплений уходит от плоскости Млечного Пути дальше чем на 300 пс, и только у нескольких старейших из них расстояние от плоскости Галактики доходит до 1 кпс.

После обнаружения в 1927 г. вращения Галактики около своего центра, расположенного в созвездии Стрельца, стало окончательно ясно, что концентрация шаровых скоплений в этом созвездии объясняется сильным возрастанием их пространственной плотности к центру Галактики, который, следовательно, должен совпадать и с центром системы шаровых скоплений. Таким

образом, расстояние до центра системы шаровых скоплений определяет и расстояние Солнца от центра Галактики. В последнюю четверть века наилучшие оценки этого расстояния находятся в пределах 7—10 кпс при наиболее вероятном значении 9 кпс. Самые далекие шаровые скопления отстоят от центра Галактики до расстояния 90 кпс, но не следует думать, что таковы размеры Галактики, поскольку ближайшие к ней другие галактики находятся на вдвое меньших расстояниях.

Исследования других галактик показали, что их спиральные рукава лучше всего обрисовываются горячими звездами и эмиссионными газовыми туманностями. Когда мы научились определять точные расстояния и возраст рассеянных скоплений Галактики, появилась надежда, что теперь, может быть, будет разгадана и ее спиральная структура. Действительно, уже в 50-х годах было найдено, что О-ассоциации располагаются в отрезках спиральных рукавов. Хотя эти отрезки весьма коротки, уже тогда стало ясно, что направление вдоль спирального рукава к центру Галактики должно совпадать с направлением ее вращения: спиральные рукава, как говорят, закручиваются и наша звездная система в этом отношении не отличается от других спиральных галактик.

Сводка данных о рассеянных скоплениях с фотоэлектрически полученными диаграммами Герцшпрунга — Рессела позволила В. Беккеру в 1963 г. подтвердить и уточнить эти результаты. Оказалось, что бесспорную концентрацию в отрезках трех спиральных рукавов показывают лишь наиболее молодые из рассеянных скоплений. С увеличением возраста скоплений обрисовываемые ими спиральные рукава становятся все более размытыми и уже не выделяются по скоплениям с возрастом в несколько десятков миллионов лет. Современная картина распределения рассеянных скоплений разного возраста в плоскости Галактики приведена на рис. 10, *а*.

Таким образом, самые молодые рассеянные скопления являются наилучшими индикаторами положения спиральных рукавов в Галактике, однако надежные расстояния известны лишь для тех из них, которые находятся не дальше 4—5 кпс от нас. Точность определения расстояний до цефеид с использованием хорошей фотометрии не хуже, чем для рассеянных скоплений, а це-

феиды известны до расстояния в 10 кпс и далее. Однако даже у самых молодых из них возраст не меньше $10^7$ лет (см. рис. 5, *в*), и поэтому лишь цефеиды с самыми большими периодами дают надежду локализовать спиральные рукава Галактики. Распределение остальных цефеид весьма напоминает распределение скоплений с возрастами $10^7$—$10^8$ лет (рис. 10, *б*), что и не удивительно, поскольку именно в этом интервале значений заключен возраст цефеид. Правда, рукав в Киле, тянущийся в направлении галактической долготы 290°, по цефеидам прослеживается лучше и дальше, чем по звездным скоплениям.

Неупорядоченное распределение в Галактике (точнее, в окрестностях Солнца) не слишком молодых рассеянных скоплений и цефеид неожиданно несет в себе важную информацию, так как ничего подобного не наблюдается в Туманности Андромеды. В ее спиральных рукавах концентрируются цефеиды всех периодов и все рассеянные скопления, различаемые на пластинках, полученных на 5-метровом рефлекторе. По сравнению с широкими спиральными рукавами Туманности Андромеды, отделенными друг от друга обширными и свободными от молодых объектов пространствами, молодые скопления Галактики в целом определяют картину слабо выраженных и близко друг к другу расположенных узких фрагментов спиральных ветвей. Это различие, по-видимому, можно объяснить в рамках представлений спиральных рукавов как волн плотности.

Согласно этой теории молодые звезды концентрируются к рукавам потому, что это спиральная волна повышенного гравитационного потенциала, прокатывающаяся по галактике. Угловая скорость вращения волны вокруг центра галактики постоянна, а у звезд и газа эта скорость зависит от расстояния до центра галактики, так что далеко от центра, на расстоянии, называемом радиусом коротации, эти скорости совпадают. Там, где они существенно отличаются, столкновение газа, находящегося в рукаве, с газом, вращающимся со скоростью вращения галактического диска, приводит к резкому повышению плотности межзвездной среды и последующему интенсивному звездообразованию. По-видимому, Солнце расположено в Галактике вблизи радиуса коротации, и поэтому в его окрестностях звездообразование слабо связано со спиральной волной плотности, Что делается

подальше, в сущности мы не знаем, поскольку оптические методы пока не могут локализовать спиральные рукава на расстояниях дальше чем 3—5 кпс, а расстояния до облаков водорода, которые концентрируются в рукавах, нам плохо известны. Поиски и исследования далеких молодых скоплений и цефеид могли бы существенно прояснить картину.

Распределения шаровых скоплений в галактической плоскости и в перпендикулярной к ней плоскости, проходящей через Солнце и центр Галактики, приведены на рис. 10, *в* и *г* (по данным А. С. Шарова). Близ центра Галактики заштрихована область, в которой наблюдается максимальная концентрация звезд того же типа, что и населяют шаровые скопления (в частности, переменные типа RR Лиры); подобной концентрации к самому центру Галактики шаровые скопления, однако, не показывают. Это объясняется тем обстоятельством, что скопления при движении вокруг центра Галактики, подходящие к нему слишком близко, сравнительно быстро разрушаются под действием приливных сил, возбуждаемых притяжением галактического ядра.

Аналогичный недостаток в числе шаровых скоплений близ центра галактики наблюдается и в Туманности Андромеды, и некоторые астрономы полагают, что продукты разрушения шаровых скоплений, неосторожно подходивших близко к центру галактики, накапливаются в нем и ответственны за образование керна звездоподобного ядра, наблюдающегося у ряда галактик. В Туманности Андромеды диаметр керна составляет около 10 пс, и он похож на сверхгигантское шаровое скопление. Огромный рост концентрации звезд в самом центре наблюдается (по результатам исследований в далеком инфракрасном диапазоне) и в нашей Галактике.

Предположив, что в пределах направленного к Солнцу угла с вершиной в центре Галактики (см. рис. 10, *в* и *г*) все шаровые скопления нам известны (и действительно, вне этого угла они встречаются гораздо реже), А. С. Шаров оценил полное число шаровых скоплений в Галактике как близкое к 500. Сейчас известна только их четвертая часть, обнаружению остальных препятствует межзвездное поглощение света. Влияние наблюдательной селекции еще сильнее сказывается на данных о рассеянных скоплениях, поскольку газопылевые облака, поглощающие свет, как и эти скопления, концентри-

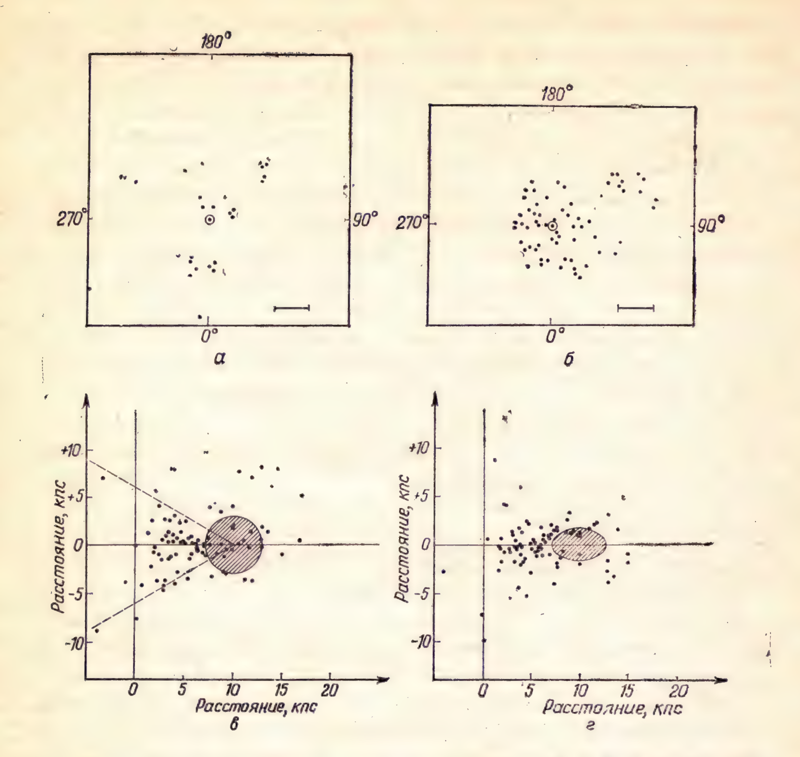



Рис. 10. Распределение звездных скоплений в Галактике (отрезком отмечено расстояние в 1 кпс): *а* — для рассеянных скоплений с возрастом $10^6$—$10^7$ лет (Солнце отмечено точкой в кружочке); *б* — для рассеянных скоплений с возрастом $10^7$—$10^8$ лет; *в* — для шаровых скоплений в галактической плоскости; *г* — для шаровых скоплений в плоскости, проходящей через Солнце и центр Галактики

руются к галактической плоскости. Сейчас известно около 1000 рассеянных скоплений, а всего их в Галактике может быть в несколько десятков раз больше.

### ЗВЕЗДНЫЕ ГРУППИРОВКИ В ДРУГИХ ГАЛАКТИКАХ

Обратимся теперь к соседним галактикам, и прежде всего к спутникам нашей звездной системы — Магеллановым Облакам. Это две неправильные галактики [10], их массы в сотни раз меньше, чем у нашей Галактики, и

[10] Галактики делятся на спиральные, эллиптические и неправильные, т. е. не обладающие осевой симметрией.

они обладают огромным количеством самых разнообразных звездных скоплений. В Большом Магеллановом Облаке (БМО) число звездных скоплений, зарегистрированных в каталогах, составляет 1600, а полное количество их там близко к 5000. В этой галактике с помощью современных средств можно обнаружить все без исключения звездные скопления (включая самые бедные звездами и старые), поскольку разрешающая способность фотографий, получаемых на работающих ныне крупных телескопах, в несколько раз выше, чем угловой диаметр наименьших скоплений в БМО. Кроме того, предельная звездная величина, достигаемая на этих телескопах, достаточна для обнаружения гигантов в самых старых скоплениях БМО, таких, например, как NGC 188 в нашей Галактике.

Очевидно, что, определив возраст скоплений (хотя бы в первом приближении по их показателям цвета) можно восстановить всю историю звездообразования в галактике, и уже сейчас имеется ряд интересных выводов об его особенностях в БМО. Прежде всего, у БМО, по-видимому, не было той эпохи первичного бурного звездообразования, следствием которой явилось быстрое обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами в нашей Галактике. Даже в наиболее молодых скоплениях и звездах высокой светимости наблюдаются признаки того, что содержание там тяжелых элементов меньше, чем в диске Галактики, а у скоплений с возрастом около $10^9$ лет это содержание в 10 раз меньше, чем у Солнца. Присутствие обычных старых шаровых скоплений и звезд типа RR Лиры говорит, о том, что звездообразование в БМО началось примерно тогда же, как и в Галактике, но оно шло более медленно, и поэтому сейчас там доля газа на порядок выше, чем в Галактике. О более равномерном (в среднем) темпе звездообразования в БМО говорит и присутствие большого количества звездных скоплений промежуточного возраста.

Большой интерес представляет обнаруженная П. Ходжем тенденция звездных скоплений БМО группироваться в пространстве и во времени: близко расположенные друг к другу скопления часто имеют и близкие возрасты. Так, например, в БМО имеется группа из 10 скоплений, из которых у всех, несмотря на разное количество членов, возрасты заключены в пределах от $5 \cdot 10^7$ до $7 \cdot 10^7$ лет; она занимает область с размерами 500×

×800 пс. Периоды цефеид, находящихся поблизости от скоплений (вплоть до расстояний в несколько сотен парсек), обычно соответствуют возрасту скоплений, имеются и обширные группы цефеид с близкими периодами. Как и в случае звездных комплексов Галактики, это надо рассматривать как явное указание на общее происхождение звезд, занимающих (во всяком случае в настоящее время) весьма большие объемы пространства.

Многие виды скоплений БМО не имеют аналогов в нашей Галактике, как, например, уже упоминавшиеся довольно молодые скопления с явно недостаточным содержанием тяжелых элементов. Есть там и весьма бедное звездами скопление HS 83, содержащее тем не менее две звезды типа RR Лиры, которое следует поэтому отнести к шаровым. Впрочем, тут надо быть очень осторожным с терминологией, лучше сказать: очень старое скопление с малым содержанием тяжелых элементов. Судя по светимости этого скопления, его масса на порядок меньше, чем у самого бедного звездами шарового скопления в Галактике. Это подкрепляет вывод В. Г. Сурдина о том, что такие же, как в БМО, бедные звездами шаровые скопления образовывались и в Галактике, но полностью там разрушились под действием приливных сил, возбуждаемых галактическим ядром. Это скопление в БМО, судя по блеску его звезд типа RR Лиры, ближе к нам, чем основная масса звезд и скоплений БМО, и, может быть, именно его изолированность помогла ему уцелеть.

Почти половина шаровых скоплений БМО являются неизвестными в нашей Галактике молодыми скоплениями с очень большим количеством членов. Их молодость была заподозрена еще давно, по голубому интегральному показателю цвета и присутствию цефеид. В настоящее же время для дюжины из них получены диаграммы Герцшпрунга — Рессела, доказывающие их молодость. Типичным примером является скопление NGC 1866, диаграмма Герцшпрунга — Рессела которого приводилась на рис. 3, *г*. Х. Шепли, искавший 30 лет назад в этом шаровом скоплении звезды типа RR Лиры, к своему удивлению обнаружил вместо них десяток цефеид, причем период у всех из них заключен в пределах от 2,5 до 3,5 сут. Узость этого интервала означает сравнительно небольшой разброс в возрастах звезд в скоплении и кратковременность того этапа в жизни массивных звезд,

на котором они пульсируют как цефеиды. В более молодых скоплениях совсем нет цефеид, но встречаются почти неизученные переменные красные сверхгиганты, подобные известным по двойному скоплению $\chi$ и $h$ Персея.

По-видимому, самым молодым из всех шаровых скоплений, обнаруженных во Вселенной, является скопление NGC 2070 в БМО. На обычных фотографиях оно скрывается за очень яркой гигантской эмиссионной туманностью, получившей за свою паукообразную форму название Тарантул. Туманность видна невооруженным глазом и имеет еще одно обозначение — 30 Золотой Рыбки. Это действительно гигантская туманность, масса ее приближается к $10^6$ масс Солнца, и будь она на месте туманности Ориона, то заняла бы все это созвездие и освещенные ею предметы отбрасывали бы заметные тени на Земле. Масса заключенного в ней звездного скопления составляет не менее $10^4$ — $10^5$ масс Солнца, а может быть, и больше.

Скопление NGC 2070 показывает сильную концентрацию к своему центру, а ярчайшие его звезды указывают на возраст, примерно равный $3 \cdot 10^6$ лет. Среди звезд особый интерес представляет собой R 136, находящаяся в центре скопления. Ее светимость равна — $10{,}6^m$ (абсолютная звездная величина в желтых лучах) чуть ли не на две величины больше, чем у следующей по блеску звезды. Спектр звезды R 136 имеет черты, характерные и для звезд класса O, и для звезд типа Вольфа — Райе (горячих звезд высокой светимости, интенсивно теряющих вещество). Многие астрономы считают, что излучения одной этой очень горячей звезды достаточно для объяснения свечения всего Тарантула. Впрочем, звезда R 136 вряд ли является одиночной. Сложный спектр и большая яркость говорят о том, что здесь несколько звезд (по некоторым данным, не менее 60), изображения которых сливаются в одно. Признаки этого имеются и на фотографиях R 136.

Примечательной особенностью скопления NGC 2070 является удивительное изобилие в нем звезд типа Вольфа — Райе. Помимо R 136, где могут скрываться, как мы видим, несколько (десятков?) звезд, в самом центральном скоплении Тарантула находится 12 объектов этого же типа и еще 8 в его окрестностях. Во всем БМО известна 101 звезда типа Вольфа — Райе (прак-

тически все из них, так как эти звезды имеют высокую светимость и характерный вид спектра), и пятая часть их концентрируется в области, занимающей едва ли не сотую часть площади, занимаемой БМО (а десятая часть — не более тысячной доли этой площади).

Звезды типа Вольфа — Райе и в других областях БМО (как и в Галактике) связаны с молодыми скоплениями, а их массы, оцениваемые по двойным системам, в состав которых они входят, близки к 10 массам Солнца. На крайнюю их молодость указывает и то обстоятельство, что они теснее всех других звезд в БМО связаны с межзвездным газом. Тем не менее уже наличие тяжелых элементов в наружных слоях звезд типа Вольфа — Райе и истечение вещества указывают на то, что эти очень молодые звезды находятся на поздней стадии своего развития. Во всяком случае единственно разумное объяснение необычной концентрации звезд типа Вольфа — Райе к центральному скоплению Тарантула состоит в том, что здесь мы наблюдаем беспрецедентную пространственную концентрацию крайне молодых звезд большой массы, которую и естественно ожидать в самом молодом из известных нам шаровом скоплении.

Необычные характеристики Тарантула, действительно напоминающие характеристики «умеренно» активных ядер галактик, привели некоторых астрономов к предположению, что этот комплекс газа и звезд и является ядром БМО. Т. Шмидт-Калер считает, что R 136 является керном — сердцевиной этого ядра, и даже усматривает резко асимметричные спиральные ветви с центром в Тарантуле. Мы видели, однако, что природа объекта R 136 особых проблем не ставит, а некоторая размытость его изображения как раз подтверждает наличие здесь крайне тесной группы звезд. Что же касается объединения горячих звезд в спиральные рукава с центром в Тарантуле, предлагаемого Шмидтом-Калером, то следует отметить, что и геометрический и динамический центры БМО находятся примерно в 1,5 кпс от скопления NGC 2070, а так никогда не бывает в спектральных галактиках. Как раз напротив, можно сказать, что потому и похожи характеристики «умеренно» активных ядер галактик на характеристики Тарантула, поскольку вблизи них находятся области активного звездообразования. Этим объясняется и высокая светимость таких ядер, и голубой интегральный показатель цвета,

а обнаруженное нетепловое радиоизлучение, может быть, связано с остатками сверхновых. Кстати, радиоизлучение самой туманности Тарантул является (этого Шмидт-Калер еще не знал) тепловым, но в ней находятся четыре дискретных нетепловых радиоисточника и два источника рентгеновского излучения, которые могут быть остатками сверхновых. Заметим, что распознать эти остатки в оптическом диапазоне на фоне яркого свечения Тарантула было бы весьма нелегко, особенно если они похожи на Крабовидную туманность — тогда они должны составлять в поперечнике лишь несколько угловых секунд!

«Вряд ли будет преувеличением сказать,— пишет И. С. Шкловский,— что ни один другой космический объект так не стимулировал развитие идей и методов современной астрофизики, как эта удивительная туманность». Но это написано о Крабовидной туманности, а не о паукообразной. Лишь в самое последнее время на Южное полушарие неба наконец-то направлены крупные телескопы и исследование Тарантула привлекает все больше внимания. Нет более удобного объекта для изучения процессов, происходящих в очагах звездообразования, тем более что космическая пыль здесь мало препятствует наблюдениям. Отсутствуют и проблемы, связанные с определением расстояний и мешающим фоном звезд: толщина БМО, на которое мы, к счастью, смотрим почти с его полюса, намного меньше, чем расстояние до этого объекта.

Поперечник самого Тарантула составляет около 200 пс, но дуги ионизованного водорода простираются от него на расстояния до 1 кпс, а в области с поперечником в 600—700 пс находятся несколько огромных ассоциаций и очень молодое шаровое скопление NGC 2100. Эта область рассматривается В. А. Амбарцумяном как типичная сверхассоциация. Вблизи самого Тарантула и на южной границе сверхассоциации находятся самые заметные в БМО пылевые облака, и если в центре Тарантула не обнаружено никаких молекулярных облаков (очевидно, из-за изобилия там горячих звезд), то на южной окраине сверхассоциации, в наиболее плотном в БМО комплексе атомарного водорода, обнаружен источник излучения в линии молекулы CO, сигнализирующий о присутствии молекулярного водорода. Пока это единственное в БМО молекулярное облако, но их поиск пока

производился лишь в четырех областях этой галактики. Сам же Тарантул расположен на окраине обширного комплекса атомарного водорода, и французские астрономы приходят к выводу, что это типичное для БМО расположение группировок молодых звезд.

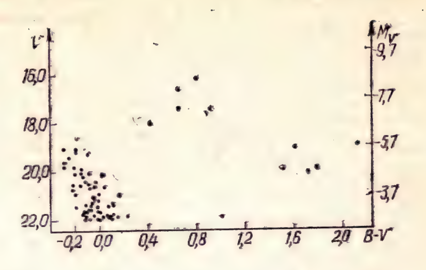


Рис. 11. Диаграмма цвет — светимость для звездной ассоциации в Туманности Андромеды

Всего в БМО выделено 122 О-ассоциации со средним поперечником в 80 пс, но поперечник 15 из них достигает 225 пс. Эти большие ассоциации иногда называют звездными облаками. Ассоциации, как правило, образуют группы с размерами в несколько сотен парсек. Эта сильная неравномерность в распределениях молодых звезд является очевидным следствием столь же неравномерного распределения межзвездного газа. Нейтральный водород в БМО сосредоточен в 50 гигантских комплексах со средней массой в $10^6$ масс Солнца и размерами в 600 пс; вблизи них обычно и находят молодые звезды, образующие столь же гигантские группировки. Поэтому и звездные скопления БМО и цефеиды также носят следы их происхождения в огромных газовых облаках, и эта крупномасштабная дискретность звездообразования представляется характерной особенностью (по крайней мере сейчас) для близких галактик.

Обширные, со средним поперечником в 480 пс, группировки голубых звезд высокой светимости выделил С. ван ден Берг в галактике М 31, известной более под названием Туманности Андромеды; он называет их ОВ-ассоциациями, хотя гораздо лучше подошло бы название звездных облаков (рис. 11). Намного меньший средний размер О-ассоциаций в Галактике ван ден Берг объясняет тем, что в Галактике можно выделить из фона лишь наиболее плотные центральные части в действительности же огромных образований. Однако звезды в самом деле высокой светимости в изобилии встречаются только в одной из «ассоциаций» М 31 — в ОВ 78. Это звездное облако настолько ярко, что получило и отдельное обозначение (NGC 206). Плотность нейтрального во-

дорода здесь несколько ниже, чем вокруг облака, и только недавно стало понятно, почему: многочисленные звезды класса О ионизуют этот водород и поэтому все облако светится в линии излучения ионизованного водорода. Однако ярких эмиссионных туманностей, сколько-нибудь напоминающих Тарантула, нет ни здесь, ни где-либо еще в М 31. В этом отношении Туманность Андромеды уступает и нашей Галактике, в которой два десятка областей ионизованного водорода превосходят по своим размерам самые большие эмиссионные туманности в М 31.

До недавнего времени в галактике М 31 было известно лишь около 300 шаровых скоплений, концентрирующихся к ее центру. Правда, интегральные показатели цвета у десятка этих скоплений указывают на их молодость, и действительно, все такие скопления попадают на спиральные ветви галактики. Судя по большой их светимости, они имеют достаточно большое количество членов и должны классифицироваться как молодые шаровые скопления, а не как богатые звездами рассеянные скопления. Проблему окончательно можно будет решить только после начала работы орбитального телескопа, с помощью которого станут доступными наблюдениям звезды $28^m$ с разрешением порядка $0{,}1''$, что в принципе позволяет строить диаграммы Герцшпрунга — Рессела этих скоплений.

С помощью пластинок, полученных в кассегреновом фокусе 4-метрового телескопа, П. Ходж недавно обнаружил в Туманности Андромеды 403 рассеянных скопления. Как уже говорилось, все они сосредоточены в спиральных рукавах. Наибольший диаметр их достигает 70 пс, и это дает лишнее основание считать, что самые большие «рассеянные» скопления в М 31 аналогичны молодым шаровым скоплениям, знакомым нам по БМО. Вполне возможно, что десяток или два молодых шаровых скоплений и в нашей Галактике скрывается в облаках пыли. Пока что только одну молодую группировку можно подозревать с достаточным для этого основанием «шаровым» скоплением. Это ОВ-ассоциация Лебедь ОВ 2, в которой на небольшой площади прячутся в области с большим поглощением света не менее 2000 ранних звезд.

В соседней с Туманностью Андромеды галактике в Треугольнике недавно очерчены границы 130 О-ассоциа-

ций со средним поперечником в 230 пс. Звездных скоплений в этой галактике известно всего два десятка, причем в большинстве своем они слабее и голубее, чем скопления в Туманности Андромеды; это, очевидно, молодые скопления.

Изучение цефеид в Туманности Андромеды, в небольших ее участках, по снимкам, полученным с помощью 5-метрового рефлектора, выявило существование там обширных группировок цефеид — звездных комплексов. Конечно, в спиральных рукавах галактики цефеиды могут группироваться на фотографиях вследствие проекции, но вдали от спиральных рукавов обнаружены по крайней мере 4 группы цефеид, периоды которых имеют близкие друг к другу значения. Очевидно, это значение соответствует эпохе наибольшей интенсивности звездообразования, причем вокруг комплексов из цефеид пространственная плотность последних столь мала, что случайность этих группировок практически невероятна. К тому же три из этих группировок цефеид совпадают с ОВ-ассоциациями ван ден Берга. Присутствие и звезд класса О и цефеид в одном комплексе означает, что разброс в возрастах в нем может достигать $5 \cdot 10^7$ лет. Их размеры, как и галактических комплексов, в среднем близки к 500 пс.

За пределами Местной группы галактик особый интерес представляют около 4000 шаровых скоплений в эллиптической галактике М 87, известной своим выбросом из ядра и мощным радиоизлучением, причем полное число скоплений в этой галактике оценивается в 10 000. Необычные характеристики галактики можно, естественно, связать с обилием скоплений — не являются ли эти характеристики следствием большого количества скоплений, разорванных приливным действием ядра галактики, и остатки которых скопились в ее центре. В расположенной поблизости от нее эллиптической галактике NGC 4472, имеющей примерно ту же светимость, шаровых скоплений по крайней мере на порядок меньше.

Сверхассоциации и комплексы ионизованного водорода, столь же обширные, как 30 Золотой Рыбки и даже большие по своим размерам, известны во многих спиральных галактиках. Они встречаются и в неправильных галактиках, но обычно бывают там в единственном числе (как в БМО). Эти комплексы иногда вносят столь заметный вклад в суммарное излучение галактики, что вся

она принимает необычно голубой цвет. Именно их присутствием объясняются некоторые характеристики ряда галактик Маркаряна.

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДНЫХ ГРУППИРОВОК

Этих вопросов мы неоднократно касались в предыдущих разделах, но пора подводить итоги. Последние годы привнесли немало нового в наши представления о процессе звездообразования, однако не изменили сути. Звезды образуются в результате гравитационной неустойчивости межзвездной газопылевой среды, что приводит к образованию достаточно плотных облаков. Последующее сжатие этих облаков ведет к их фрагментации на протозвезды, сжимающиеся далее в звезды. Поэтому-то звезды и образуются только группами.

Для сжатия облаков необходим отвод возникающего при этом тепла, и оказывается, что подобное и происходит при инфракрасном (для которого облака прозрачны) излучении молекул водорода, возбуждающегося при столкновениях молекул. Наблюдения, проведенные в последние годы, показывают, что звездообразование всегда связано с облаками именно молекулярного водорода. Гравитационному сжатию облаков газа способствует повышение внешнего давления, и многие теоретики считают это повышение необходимым условием по крайней мере для образования звезд большой массы. Таким образом, звездообразование в облаке межзвездного водорода скорее всего начинается тогда, когда через облако проходит либо волна плотности, связанная со спиральным рукавом, либо ударная волна от взрыва сверхновой, или если есть горячие звезды, от которых распространяется звездный ветер, и, наконец, при столкновении облаков. Действительно, в больших областях звездообразования всегда можно найти одну из этих четырех причин повышения внешнего давления.

Каждые две недели публикуется до десятка работ, в которых рассматриваются конкретные механизмы, действующие в том или ином очаге звездообразования. Если раньше было только известно, при каких условиях **возможно** звездообразование, то как сейчас установлено методами всеволновой астрономии, температура и плотность в ряде газовых облаков таковы, что звездо-

образование там **неизбежно** должно идти. В настоящее время обнаружено множество конкретных признаков звездообразования, в том числе существование протозвезд с плотностью, промежуточной между плотностями звезд, и газовых облаков, а также гравитационное сжатие ряда облаков.

Как недавно стало известно, молекулярные облака[11], как правило, образуют гигантские комплексы со средней массой $5 \cdot 10^5$ масс Солнца и поперечником в 40—50 пс. От 3000 до 4000 таких комплексов должно быть в пределах кольца, ограниченного радиусами 4 и 8 кпс от центра Галактики, и на расстоянии около 5 кпс от центра Галактики в них сосредоточено до 90% массы межзвездного вещества. Эти молекулярные комплексы образуют наиболее плоскую составляющую из всех населений Галактики: полуширина их распределения вокруг галактической плоскости составляет всего 60 пс, вдвое меньше, чем у распределения атомарного водорода.

Поскольку в молекулярных облаках обычно сосредоточены очаги звездообразования, то подобными гигантскими масштабами должны, очевидно, обладать и группировки молодых звезд. Кроме того, так как молекулярные комплексы обладают сложной структурой (с несколькими максимумами в распределении плотности), то ее следы должны прослеживаться и в их потомках — звездных комплексах или ассоциациях, которые обычно состоят из нескольких подгрупп или скоплений. Все это повсеместно наблюдается в очагах звездообразования, а встречающееся часто изменение возраста молодых скоплений в пределах очага звездообразования естественно объясняется распространением волны плотности по молекулярному комплексу, стимулирующей звездообразование.

Правда, размеры звездных комплексов, как мы видели, в среднем на порядок больше, чем у молекулярных комплексов, но это, по-видимому, вызвано тем, что в группировках, в которых образовались звезды класса O или вспыхивали сверхновые, значительная часть газа выметается излучением последних. В результате гравитационная связь между звездами ослабевает, и они мед-

---

[11] Напомним, что они в основном состоят из молекул водорода (и из непроявляющего себя гелия), а несколько десятков сложных других молекул играют роль примеси. Доля же твердых частиц (пыли) составляет около 1%.

ленно расходятся от места своего рождения. Так или иначе звездные скопления с возрастом, превышающим $10^7$ лет, уже не обнаруживают никакой связи с молекулярными облаками. Интересно отметить, что разброс скоростей в звездных комплексах весьма близок к наблюдающемуся в молекулярных комплексах. Не говорит ли это о правоте некоторых астрономов в том, что молекулярные комплексы удерживаются от своего быстрого разлета или сжатия магнитным полем? Образующиеся из газа звезды уже не могут удерживаться магнитным полем, но, сохранив разброс скоростей, присущий газу, занимают через несколько десятков миллионов лет гораздо больший объем. Далее, под влиянием неоднородного вращения Галактики они постепенно расходятся на все большие расстояния друг от друга. Наблюдаемые размеры комплексов, их возраст и разброс скоростей согласуются с этой картиной.

Как сейчас обнаружено, гигантские области ионизованного водорода, обрисовывающие спиральные ветви, всегда связаны с молекулярными комплексами. Но поскольку существование таких областей выдает присутствие там звезд класса O, то это все вместе означает, что звездообразование в молекулярных облаках стимулируется прежде всего галактической спиральной волной плотности (хотя распределение самих облаков, по-видимому, никак не связано со спиральными рукавами). Не дает ли это ключ к пониманию причин изобилия молодых шаровых скоплений в БМО и их практического отсутствия в спиральных галактиках? Ведь около половины шаровых скоплений в БМО являются молодыми, в галактиках M 33 и NGC 2403 со слабо выраженными спиральными рукавами (что указывает на небольшое повышение там плотности) таких скоплений большинство, а в Туманности Андромеды и нашей Галактике с их ярко выраженными (вдали от радиуса коротации!) спиральными рукавами доля молодых шаровых скоплений составляет лишь несколько процентов.

Можно предположить, что сильная галактическая спиральная волна плотности стимулирует звездообразование во всем молекулярном комплексе, приводящее к образованию звездного комплекса, каким бы ни было распределение там плотности в момент ее прихода. В неправильных же галактиках многие молекулярные облака имеют возможность при отсутствии внешних воздействий

просуществовать до того момента, когда плотность в их центре под действием лишь собственной тяжести станет достаточной для звездообразования. В результате образуется скопление с резкой концентрацией к центру, и если его масса достаточно велика, мы называем такое скопление шаровым.

Предположение о том, что спиральная волна плотности не оставляет газовому облаку времени для спокойной конденсации в шаровое скопление, можно было бы проверить, изучая эти скопления в галактиках с разной степенью развитости спиральной структуры. В галактиках с яркими, хорошо выраженными спиральными рукавами, как в М 51 и М 81, молодых шаровых скоплений не должно быть, по крайней мере вдали от радиуса коротации. Чтобы определить тип и возраст скоплений в этих галактиках, необходимо использовать самые крупные телескопы. Эта задача важна и безотносительно к обсуждающейся здесь гипотезе — такие исследования способствовали бы пониманию и процессов звездообразования и природы спиральных ветвей галактик.

В будущем, может быть, появятся и другие объяснения большего числа молодых шаровых скоплений в неправильных галактиках, но уже и сейчас несомненна связь между долей молодых шаровых скоплений и развитостью спиральной структуры, существующая в галактиках.

Сейчас, пожалуй, наиболее трудной и в то же время интересной проблемой из всех, связанных со звездообразованием, является происхождение молекулярных комплексов. Буквально в самое последнее время появляется все больше наблюдательных данных о том, что местом их рождения являются наиболее плотные части больших комплексов нейтрального водорода. Как уже упоминалось, единственный пока молекулярный комплекс, обнаруженный в БМО, связан с наиболее плотным в этой галактике комплексом нейтрального водорода. В Туманности Андромеды излучение молекул СО обнаруживается неизменно в областях с наибольшей плотностью водородного газа и пыли. Кстати говоря, эти области находятся, как и предсказывает волновая теория спиральных рукавов, у внутреннего края звездных спиральных ветвей, где и идет сейчас звездообразование (скрытое пока от любопытных глаз астрономов). Неопределенность в оценках расстояний до этих объектов

затрудняет изучение взаимосвязи молекулярного и атомарного водорода в Галактике, но эта связь безусловно существует.

Волновая теория спиральных рукавов может объяснить и возникновение больших комплексов межзвездного газа, но они существуют и в неправильных галактиках. Трудно понять и большой возраст гигантских молекулярных облаков, превышающий характерное время ($10^8$ лет) между повторным приходом спиральной волны плотности, вращающейся вокруг центра Галактики, к тому же самому месту. Возможно, что гигантские молекулярные комплексы образуются при столкновении и слиянии отдельных облаков; важную роль здесь должно играть и накапливание межзвездного вещества в магнитных «ямах».

Обнаружение молекулярных облаков в наиболее плотных частях облаков нейтрального водорода, собственно говоря, вполне естественно, поскольку молекулы водорода образуются на пылинках из атомов водорода при вполне определенной температуре — около 12 К. При более низкой температуре атомы не могут двигаться по поверхности пылинки и тем самым неспособны отыскать себе партнера — второй атом водорода; при более же высокой температуре у них больше шансов преждевременно покинуть пылинку. В межзвездном пространстве температура выше 12 К, и поэтому молекулы могут образовываться лишь в наиболее плотных и холодных частях комплексов нейтрального водорода. Таким образом, основной проблемой здесь является образование комплексов атомарного водорода.

Эту цепочку вопросов и проблем можно продолжить и дальше, пока мы не упремся в космологическую проблему, далекую, по-видимому, от своего решения. На самых ранних стадиях расширения Вселенной ищут решение и проблемы образования галактик, после чего будет, наверное, разгадано и происхождение гигантских газовых комплексов. Во всяком случае мы теперь достаточно надежно знаем, что именно пока нам известно и что пока нет. Может быть, надежное проведение этой границы и является достижением современного естествознания, отличающего его от наук предыдущих эпох.

В заключение отметим, что происхождение и эволюция звезд, строение галактик и история звездообразования в них, шкала расстояний во Вселенной и, значит, ее

возраст — самые фундаментальные проблемы астрономии — решаются при исследованиях звездных скоплений. Конечно, изучение этих «городов» и «деревень», разбросанных на «континентах» — галактиках, интересно и само по себе. Молекулярные облака, связанные с молодыми скоплениями, рентгеновские источники в центрах старых шаровых скоплений, обнаруженные в последние годы, показывают, сколько неожиданного таится еще в звездных скоплениях. Детальное исследование скоплений в ближайших галактиках представляется важнейшей задачей будущих работ, ибо уже пример БМО показывает, какие диковинные разновидности скоплений встречаются за пределами нашей Галактики и как их особенности связаны с характеристиками материнской системы и их положением в ней. Этой задаче уже уделяют много времени крупнейшие телескопы мира, входит она и в программу планируемой работы орбитальных телескопов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

(звездочкой отмечена литература повышенной трудности)


Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика.— М.: Наука, 1980.

Бок Б., Бок П. Млечный Путь.— М.: Мир, 1978.

Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной.— М.: Наука, 1977.

Засов А. В. Галактики.— М.: Знание, 1976.

Каплан С. А. Физика звезд. — М.: Наука, 1977.

Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть.— М.: Наука, 1977.

* Звезды и звездные системы. /Под ред. Д. Я. Мартынова.— М.: Наука, 1981.

* Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Межзвездная среда.— М.: Наука, 1980.

* Происхождение и эволюция галактик и звезд. /Под ред. С. Б. Пикельнера.— М.: Наука, 1976.

* Холопов П. Н. Звездные скопления.— М.: Наука, 1981.

* Физика космоса: Маленькая энциклопедия. /Под ред. С. Б. Пикельнера, Д. А. Франк-Каменецкого. — М.: Сов. энц-дия, 1976.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . . . . . . . . . . 3
Что такое звезды? . . . . . . . . . . 6
Звездные скопления и эволюция звезд . . . 10
Типы звездных группировок . . . . . . 16
Самые молодые скопления . . . . . . 18
Скопления среднего возраста . . . . . . 23
Звездные комплексы . . . . . . . . . 31
Старые скопления . . . . . . . . . . 34
Расстояния до звездных скоплений . . . . 41
Распределение скоплений в Галактике . . . 45
Звездные группировки в других галактиках . 49
Происхождение и эволюция звездных группировок 58
Рекомендуемая литература . . . . . . 63

**Юрий Николаевич Ефремов**

ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Главный отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин
Редактор Е. Ю. Ермаков
Мл. редактор Т. И. Елова
Обложка А. А. Астрецова
Худож. редактор М. А. Гусева
Техн. редактор Т. В. Луговская
Корректор Н. К. Пехтерева

ИБ № 2814

Сдано в набор 18.08.80 г. Подписано к печати 12.09.80 г. Т 16957. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,45. Тираж 30 430 экз. Заказ № 1495. Цена 11 коп. Издательство. «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 804210.
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

11 коп.

Индекс 70101

